

150

日本国特許庁
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出願年月日 Date of Application: 2003年 7月16日

出願番号 Application Number: 特願2003-275554

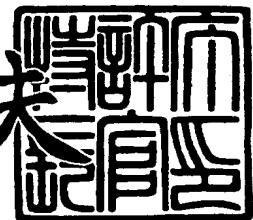
[ST. 10/C]: [JP2003-275554]

出願人 Applicant(s): 三菱電機株式会社

2003年10月21日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

今井康夫



【書類名】 特許願
【整理番号】 541887JP03
【提出日】 平成15年 7月16日
【あて先】 特許庁長官殿
【国際特許分類】 H01S 5/028
【発明者】
 【住所又は居所】 東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三菱電機株式会社内
 【氏名】 鳴原 君男
【発明者】
 【住所又は居所】 東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三菱電機株式会社内
 【氏名】 川崎 和重
【特許出願人】
 【識別番号】 000006013
 【住所又は居所】 東京都千代田区丸の内二丁目2番3号
 【氏名又は名称】 三菱電機株式会社
【代理人】
 【識別番号】 100086405
 【弁理士】
 【氏名又は名称】 河宮 治
 【電話番号】 06-6949-1261
 【ファクシミリ番号】 06-6949-0361
【選任した代理人】
 【識別番号】 100098280
 【弁理士】
 【氏名又は名称】 石野 正弘
 【電話番号】 06-6949-1261
 【ファクシミリ番号】 06-6949-0361
【選任した代理人】
 【識別番号】 100113170
 【弁理士】
 【氏名又は名称】 稲葉 和久
 【電話番号】 06-6949-1261
 【ファクシミリ番号】 06-6949-0361
【先の出願に基づく優先権主張】
 【出願番号】 特願2002-283438
 【出願日】 平成14年 9月27日
【先の出願に基づく優先権主張】
 【出願番号】 特願2003- 57238
 【出願日】 平成15年 3月 4日
【手数料の表示】
 【予納台帳番号】 163028
 【納付金額】 21,000円
【提出物件の目録】
 【物件名】 特許請求の範囲 1
 【物件名】 明細書 1
 【物件名】 図面 1
 【物件名】 要約書 1
 【包括委任状番号】 0010684

【書類名】特許請求の範囲

【請求項 1】

活性層と、前記活性層を挟む2枚のクラッド層とからなる導波層を含む積層構造体と、前記積層構造体の一対の相対する端面部のうち少なくとも一方の端面部に形成された多層反射膜と

を備え、

前記多層反射膜は、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ が、前記導波層を導波する光の波長 λ について、 $\sum n_i d_i > \lambda / 4$ の関係を満足すると共に、

前記多層反射膜は、前記波長 λ の場合の反射率 $R(\lambda)$ を基準として、+2.0%以下となる前記波長 λ を含む連続する波長帯域幅 $\Delta \lambda$ が、前記積層構造体の実効屈折率 n_c と前記波長 λ の場合の反射率 $R'(\lambda)$ について、下記の関係式、

$$R'(\lambda) = ((n_c - n_f^2) / (n_c + n_f^2))^2$$

を満たす屈折率 n_f の仮想単層反射膜を厚さ $5\lambda / (4n_f)$ だけ前記端面部に形成した場合の反射率 R' を基準として、+2.0%以下となる前記波長 λ を含む連続した波長帯域幅 $\Delta' \lambda$ よりも広いことを特徴とする半導体光素子。

【請求項 2】

活性層と、前記活性層を挟む2枚のクラッド層とからなる導波層を含む積層構造体と、前記積層構造体の一対の相対する端面部のうち少なくとも一方の端面部に形成された多層反射膜と

を備え、

前記多層反射膜は、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ が、前記導波層を導波する光の波長 λ について、 $\sum n_i d_i > \lambda / 4$ の関係を満足すると共に、

前記多層反射膜は、反射率が前記波長 λ の場合の反射率 $R(\lambda)$ を基準として-1%から+2.0%の範囲内となる前記波長 λ を含む連続する波長帯域幅 $\Delta \lambda$ を、前記波長 λ で割った値 $\Delta \lambda / \lambda$ が0.062以上であることを特徴とする半導体光素子。

【請求項 3】

活性層と、前記活性層を挟む2枚のクラッド層とからなる導波層を含む積層構造体と、前記積層構造体の一対の相対する端面部のうち少なくとも一方の端面部に形成された多層反射膜と

を備え、

前記多層反射膜は、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ が、前記導波層を導波する光の波長 λ について、 $\sum n_i d_i > \lambda / 4$ の関係を満足すると共に、

前記多層反射膜は、反射率が前記波長 λ の場合の反射率 $R(\lambda)$ を基準として-1.5%から+1.0%の範囲内となる前記波長 λ を含む連続する波長帯域幅 $\Delta \lambda$ を、前記波長 λ で割った値 $\Delta \lambda / \lambda$ が0.066以上であることを特徴とする半導体光素子。

【請求項 4】

前記多層反射膜は、前記導波層を含む前記積層構造体の実効屈折率 n_c の平方根より大きい屈折率の第1反射膜と、前記実効屈折率 n_c の平方根より小さい第2反射膜とを含むことを特徴とする請求項1に記載の半導体光素子。

【請求項 5】

前記多層反射膜は、前記第1反射膜と前記第2反射膜とが交互に積層されていることを特徴とする請求項4に記載の半導体光素子。

【請求項 6】

前記多層反射膜のうち、前記導波層に接する第1層膜は、前記導波層を含む前記積層構造体の実効屈折率 n_c の平方根よりも小さい屈折率を有することを特徴とする請求項1に記載の半導体光素子。

【請求項 7】

前記多層反射膜は、3種類以上の膜で構成されることを特徴とする請求項1に記載の半導体光素子。

【請求項8】

前記多層反射膜は、7層膜で構成されていることを特徴とする請求項1に記載の半導体光素子。

【請求項9】

前記多層反射膜は、6層膜で構成されていることを特徴とする請求項1に記載の半導体光素子。

【請求項10】

前記多層反射膜は、9層膜で構成されていることを特徴とする請求項1に記載の半導体光素子。

【請求項11】

前記多層反射膜のうち、前記導波層に接する第1層膜は、前記多層反射膜の中で最も大きい熱伝導率を有することを特徴とする請求項1に記載の半導体光素子。

【請求項12】

前記多層反射膜のうち、前記導波層に接する第1層膜は、窒化アルミニウムからなることを特徴とする請求項1に記載の半導体光素子。

【請求項13】

前記多層反射膜の反射率の極小値は、1～32%の範囲内にあることを特徴とする請求項1に記載の半導体光素子。

【請求項14】

前記多層反射膜のうち、前記導波層に接する第1層膜及び第2層膜は、前記導波層を含む前記積層構造体の実効屈折率 n_c の平方根よりも小さい屈折率を有することを特徴とする請求項1に記載の半導体光素子。

【請求項15】

前記多層反射膜は、8層膜で構成されていることを特徴とする請求項1に記載の半導体光素子。

【書類名】明細書

【発明の名称】半導体光素子

【技術分野】

【0001】

本発明は、光情報処理用の光源、光通信の信号、及びファイバアンプの励起光源などとして用いられる半導体レーザ素子、及び光信号を増幅する半導体増幅器及び光信号を変調する光変調器等の半導体光素子に関する。

【背景技術】

【0002】

半導体レーザ素子や、光変調器等の半導体光素子の端面部の導波層には、通常、反射膜がコーティングされている。この半導体光素子の端面部に設けられた反射膜（コーティング膜：屈折率 n_1 ）の膜厚 d を $\lambda / (4 n_1)$ の奇数倍とすると、反射膜の反射率は極小値をとる。さらに、端面部に導波層を含む積層構造体の屈折率 n_c の平方根の屈折率を有するコーティング膜を形成することによって無反射膜が得られる。例えば、半導体レーザの端面の反射膜を無反射膜とした例（例えば、非特許文献1を参照）が知られている。

【0003】

半導体光素子の端面部の導波層を含む積層構造体（実効屈折率 $n_c = 3.37$ ）に膜厚を変えて形成された単層反射膜（屈折率 $n_1 = 1.449$ ）の反射率の波長依存性を考える。ここで、設定波長 $\lambda = 980\text{ nm}$ で反射率が最小値をとるように設定する。反射率が最小値をとる場合とは、 $\lambda / (4 n_1)$ の奇数倍の膜厚の場合である。そこで、膜厚 $\lambda / (4 n_1)$ の単層反射膜の場合と、膜厚 $5\lambda / (4 n_1)$ の単層反射膜のそれぞれの場合について検討すると、膜厚 $\lambda / (4 n_1)$ の単層反射膜のほうが膜厚 $5\lambda / (4 n_1)$ の単層反射膜より反射率の極小値近傍における平坦部分が広い。

【0004】

具体的には以下の通りである。厚さ $d_1 = \lambda / (4 n_1)$ の場合は、波長 980 nm で極小反射率値 4% となり、極小反射率値 + 2% の波長帯域は 848 nm から 1161 nm の 313 nm と広い。一方、厚さ $d_1 = 5\lambda / (4 n_1)$ の場合は、波長 980 nm で極小反射率値 4% は同じであるが、極小反射率値 + 2% の波長帯域は 951 nm から 1011 nm の 60 nm と極端に狭くなる。このとき、波長帯域を所定の波長で割った値は 0.061 となる。また、極小反射率値 + 2.5% の波長帯域は 949 nm から 1013 nm の 64 nm であり、この波長帯域を所定波長 980 nm で割った値は 0.065 となる。

【0005】

【非特許文献1】 I. Ladany, et al., "Scandium oxide antireflection coatings for superluminescent LEDs", Appl. Opt. Vol. 25, No. 4, pp.472-473, (1986)

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

上記のように半導体光素子の端面部の反射膜の膜厚 d を $\lambda / (4 n_1)$ の奇数倍で厚膜化した場合には、反射率の極小値近傍における低反射率領域の波長帯域が狭くなり、半導体レーザ特性が反射膜の反射率の波長依存性の影響を受けて大きく変化するという問題があった。

【0007】

そこで、本発明の目的は、極小反射率近傍の波長帯域が広い反射膜を備えた半導体光素子を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0008】

本発明に係る半導体光素子は、活性層と、前記活性層を挟む 2 枚のクラッド層とからなる導波層を含む積層構造体と、

前記積層構造体の一対の相対する端面部のうち少なくとも一方の端面部に形成された多層反射膜と

を備え、

前記多層反射膜は、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ が、前記導波層を導波する光の波長 λ について、 $\sum n_i d_i > \lambda / 4$ の関係を満足すると共に、

前記多層反射膜は、前記波長 λ の場合の反射率 $R(\lambda)$ を基準として、+2.0%以下となる前記波長 λ を含む連続する波長帯域幅 $\Delta \lambda$ が、前記積層構造体の実効屈折率 n_c と前記波長 λ の場合の反射率 $R'(\lambda)$ とについて、下記の関係式、

$$R'(\lambda) = ((n_c - n_f^2) / (n_c + n_f^2))^2$$

を満たす屈折率 n_f の仮想単層反射膜を厚さ $5\lambda / (4n_f)$ だけ前記端面部に形成した場合の反射率 R' を基準として、+2.0%以下となる前記波長 λ を含む連続した波長帯域幅 $\Delta' \lambda$ よりも広いことを特徴とする。

【0009】

本発明に係る半導体光素子は、活性層と、前記活性層を挟む2枚のクラッド層とからなる導波層を含む積層構造体と、

前記積層構造体の一対の相対する端面部のうち少なくとも一方の端面部に形成された多層反射膜と

を備え、

前記多層反射膜は、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ が、前記導波層を導波する光の波長 λ について、 $\sum n_i d_i > \lambda / 4$ の関係を満足すると共に、

前記多層反射膜は、反射率が前記波長 λ の場合の反射率 $R(\lambda)$ を基準として-1.0%から+2.0%の範囲内となる前記波長 λ を含む連続する波長帯域幅 $\Delta \lambda$ を、前記波長 λ で割った値 $\Delta \lambda / \lambda$ が0.062以上であることを特徴とする。

【0010】

本発明に係る半導体光素子は、活性層と、前記活性層を挟む2枚のクラッド層とからなる導波層を含む積層構造体と、

前記積層構造体の一対の相対する端面部のうち少なくとも一方の端面部に形成された多層反射膜と

を備え、

前記多層反射膜は、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ が、前記導波層を導波する光の波長 λ について、 $\sum n_i d_i > \lambda / 4$ の関係を満足すると共に、

前記多層反射膜は、反射率が前記波長 λ の場合の反射率 $R(\lambda)$ を基準として-1.5%から+1.0%の範囲内となる前記波長 λ を含む連続する波長帯域幅 $\Delta \lambda$ を、前記波長 λ で割った値 $\Delta \lambda / \lambda$ が0.066以上であることを特徴とする。

【0011】

なお、 $\sum n_i d_i$ について、好ましくは $\sum n_i d_i > 5\lambda / 4$ の関係を満たすことである。これによりさらに厚い反射膜とすることができます。また、上記波長帯域幅 $\Delta \lambda$ を、前記波長 λ で割った値 $\Delta \lambda / \lambda$ は、好ましくは、0.070以上であり、さらに好ましくは0.090以上、またさらに好ましくは0.10以上である。低反射率の波長帯域幅 $\Delta \lambda$ が広いと、反射率の波長依存性が小さいので、導波光の波長が変化した場合にも特性変化を抑制できる。

【発明の効果】

【0012】

本発明に係る半導体光素子によれば、多層反射膜のそれぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、導波層を導波する光の所定波長、例えば980nmの1/4波長より大きい。さらに、この多層反射膜の $\sum n_i d_i$ は、導波光のおよそ5/4波長よりも大きく、非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。また、多層反射膜は、波長の関数である反射率が、設定波長 λ における反射率-1%から+2%の範囲内となる連続する波長帯域幅 $\Delta \lambda$ を、上記波長 λ

で割った値 $\Delta \lambda / \lambda$ が 0.062 以上である。または、多層反射膜は、波長の関数である反射率が、設定波長 λ における反射率 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲内となる連続する波長帯域幅 $\Delta \lambda'$ を、上記波長 λ で割った値 $\Delta \lambda' / \lambda$ が 0.066 以上である。これにより、非常に厚い膜であるにもかかわらず、一定反射率の波長帯域 $\Delta \lambda$ ($\Delta \lambda'$) が広くなる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0013】

本発明の実施の形態に係る半導体光素子について、添付図面を用いて説明する。なお、図面において、実質的に同一の部材には同一の符号を付している。

【0014】

まず、本発明の実施の形態に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜の反射率の算出について、図1から図5を用いて説明する。図1は、複素数表示された振幅反射率 r を示す複素平面図である。図2は、半導体光素子の端面部の単層反射膜を示す概略断面図である。図3は、図2の単層反射膜に代えて2層反射膜を設けた場合の概略断面図である。図4は、図2の単層反射膜に代えて4層反射膜を設けた場合の概略断面図である。図5は、単層反射膜に代えて7層反射膜を設けた場合の概略断面図である。波長 λ の光についての複素数表示された振幅反射率 r は、次式(1)で表され、図1の複素平面図上に表すことができる

$$r = r_r(\lambda) + i r_i(\lambda) \quad (1)$$

ここで、 i は虚数単位 ($i = (-1)^{1/2}$) であり、 $r_r(\lambda)$ は、実数部であり、 $r_i(\lambda)$ は、虚数部である。通常用いられる反射率は、上記の振幅反射率の2乗であって、この反射率がゼロとなる場合とは、下記式(2a)、(2b)のように振幅反射率の実数部及び虚数部とが共にゼロとなる場合である。これらの関係式を解くことによって反射率がゼロとなる条件を得ることができる。

$$r_r(\lambda) = 0 \quad (2a)$$

$$r_i(\lambda) = 0 \quad (2b)$$

【0015】

一方、ゼロでない反射率を求めようとする場合には、図1の複素平面上で円周上の各点の振幅反射率が該当することとなるため、上記のような条件式が一義的には定まらない。そこで、導波する光の波長 λ について所望の反射率が得られる仮想的な単層反射膜を考える。図2は、半導体光素子の導波層10の端面に単層反射膜1を設けた仮想単層反射膜の概略断面図である。反射膜1は大気等の自由空間5に面している。単層反射膜1の振幅反射率 r を最小にする条件は、半導体光素子の導波層10を導波する光の波長 λ 、単層反射膜1の屈折率 n_f 及び膜厚 d_f を用いて、下記式(3)で表される。

【数1】

$$d_f = \frac{\lambda}{4n_f} (2m+1) \quad (3)$$

ここで、 $m = 0, 1, 2, 3$ 等の負でない整数である。

【0016】

この仮想単層膜の振幅反射率 r の最小値は、下記式(4)で表される。

【数2】

$$r = \frac{n_c - n_f^2}{n_c + n_f^2} \quad (4)$$

【0017】

なお、反射率 R は、振幅反射率 r について、 $|r|^2$ で表される。つまり、 $R = ((n_c - n_f^2) / (n_c + n_f^2))^2$ で表される。従って、反射率 $R = 4\%$ を得ようとすると、半導体光素子の導波層の実効屈折率 $n_c = 3.37$ の場合には、上記式を解いて、単層反射膜1の屈折率 n_f として、2.248又は1.499が得られる。しかし、通常

、このような屈折率を有する单層膜は得られないことが多い。そこで、上記仮想单層反射膜を多層反射膜で置換することについて検討する。

【0018】

上記の单層反射膜に代えて、2層反射膜を設けた場合の反射率について検討する。図3は、仮想单層反射膜に代えて、端面部に2層反射膜を用いた場合の概略断面図である。この2層反射膜の反射率の極小値を所定値に設定する条件について、本発明者らによる検討結果を説明する。2層反射膜を構成する第1層膜1及び第2層膜2の位相変化をそれぞれ ϕ_1 、 ϕ_2 とすると、下記式(5)及び(6)のように定義される。

【数3】

$$\phi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 d_1 \quad (5)$$

【数4】

$$\phi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} n_2 d_2 \quad (6)$$

【0019】

この場合に、複素数表示による振幅反射率 r は次式(7)で表される。

【数5】

$$r = \frac{\text{Re}1 + i\text{Im}1}{\text{Re}2 + i\text{Im}2} \quad (7)$$

ここで、 i は虚数単位であり、 $\text{Re}1$ 及び $\text{Re}2$ はそれぞれ分子・分母の実数部であり、 $\text{Im}1$ 、 $\text{Im}2$ はそれぞれ分子・分母の虚数部である。

【0020】

上記式(7)の分子・分母における実部部 $\text{Re}1$ 、 $\text{Re}2$ と虚部部 $\text{Im}1$ 、 $\text{Im}2$ は、それぞれ次式(8a)から式(8d)のように表される。

【数6】

$$\text{Re}1 = (n_c - 1) \cos \phi_1 \cos \phi_2 + \left(\frac{n_1}{n_2} - \frac{n_2 n_c}{n_1} \right) \sin \phi_1 \sin \phi_2 \quad (8a)$$

【数7】

$$\text{Im}1 = - \left\{ \left(\frac{n_c}{n_2} - n_2 \right) \cos \phi_1 \sin \phi_2 + \left(\frac{n_c}{n_1} - n_1 \right) \sin \phi_1 \cos \phi_2 \right\} \quad (8b)$$

【数8】

$$\text{Re}2 = (n_c + 1) \cos \phi_1 \cos \phi_2 - \left(\frac{n_2 n_c}{n_1} + \frac{n_1}{n_2} \right) \sin \phi_1 \sin \phi_2 \quad (8c)$$

【数9】

$$\text{Im}2 = - \left\{ \left(\frac{n_c}{n_2} + n_2 \right) \cos \phi_1 \sin \phi_2 + \left(\frac{n_c}{n_1} + n_1 \right) \sin \phi_1 \cos \phi_2 \right\} \quad (8d)$$

【0021】

また、電力反射率 R は、上記振幅反射率 r を用いて $|r|^2$ で表される。この式(7)で表される振幅反射率が、式(4)で表される上記仮想单層反射膜の振幅反射率と等しくなるように厚さ d_1 及び d_2 を決めればよい。

【0022】

図4は、单層反射膜に代えて、端面部に4層反射膜を設ける場合の概略断面図である。この4層反射膜の反射率が設定波長で前記仮想单層膜の反射率と同一になる条件について

検討する。4層反射膜の場合には、振幅反射率は下記式(9)で表される。

【数10】

$$r = \frac{(m_{11} + m_{12})n_c - (m_{21} + m_{22})}{(m_{11} + m_{12})n_c + (m_{21} + m_{22})} \quad (9)$$

【0023】

ここで、 $m_{i,j}$ (i, j は 1 又は 2) は下記式(10)で表される。

【数11】

$$\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos A\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin A\phi_1 \\ -in_1 \sin A\phi_1 & \cos A\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos A\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin A\phi_2 \\ -in_2 \sin A\phi_2 & \cos A\phi_2 \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} \cos B\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin B\phi_1 \\ -in_1 \sin B\phi_1 & \cos B\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos B\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin B\phi_2 \\ -in_2 \sin B\phi_2 & \cos B\phi_2 \end{pmatrix} \quad (10)$$

なお、A, B は、第1層膜1の膜厚A d 1、第2層膜2の膜厚A d 2、第3層膜3の膜厚B d 1、第4層膜4の膜厚B d 2とした場合の、それぞれの2層膜(ペア)の寄与率を表すパラメータである。

【0024】

図5は、単層反射膜に代えて、導波層10の端面部に7層反射膜20を設けた場合の概略断面図である。この7層反射膜20の反射率が前記仮想単層膜の反射率と同一になるよう設定する条件について検討する。7層反射膜20の場合には、振幅反射率は、4層反射膜と同様に下記式(11)で表される。

【数12】

$$r = \frac{(m_{11} + m_{12})n_c - (m_{21} + m_{22})}{(m_{11} + m_{12})n_c + (m_{21} + m_{22})} \quad (11)$$

【0025】

ここで、 $m_{i,j}$ (i, j は 1 又は 2) は下記式(12)で表される。

【数13】

$$\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos O\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin O\phi_2 \\ -in_2 \sin O\phi_2 & \cos O\phi_2 \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} \cos A\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin A\phi_1 \\ -in_1 \sin A\phi_1 & \cos A\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos A\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin A\phi_2 \\ -in_2 \sin A\phi_2 & \cos A\phi_2 \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} \cos B\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin B\phi_1 \\ -in_1 \sin B\phi_1 & \cos B\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos B\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin B\phi_2 \\ -in_2 \sin B\phi_2 & \cos B\phi_2 \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} \cos C\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin C\phi_1 \\ -in_1 \sin C\phi_1 & \cos C\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos C\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin C\phi_2 \\ -in_2 \sin C\phi_2 & \cos C\phi_2 \end{pmatrix} \quad (12)$$

なお、O, A, B, C は、第1層膜11の膜厚O d 2、第2層膜12の膜厚A d 1、第3層膜13の膜厚A d 2、第4層膜14の膜厚B d 1、第5層膜15の膜厚B d 2、第6層膜16の膜厚C d 1、第7層膜17の膜厚C d 2とした場合の、それぞれの2層膜(ペア)の寄与率を表すパラメータである。

【0026】

実施の形態1.

本発明の実施の形態1に係る半導体光素子について、図5及び図6を用いて説明する。図5は、単層反射膜に代えて7層反射膜を設けた場合の概略断面図である。この半導体光素子は、例えば、半導体レーザ素子、光変調器、光スイッチ等である。この半導体光素子は、光が導波する導波層の端面部に所定波長を中心とした広い波長帯域にわたって低反射率を有する多層反射膜を設けている。このように低反射率の多層反射膜を設けることにより、例えば、半導体レーザ素子の場合にはいわゆる戻り光によるノイズ等の発生を低減することができる。また、光変調器及び光スイッチの場合には、信号を低損失で透過させることができる。また、この多層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率を有するので、発振波長が変化した場合や、信号の中心波長が変化した場合にも反射特性の波長依存性を抑制できる。

【0027】

以下、半導体光素子の端面部に設けた7層反射膜20について図5を用いて説明する。図5は、半導体光素子の端面部に設けた7層反射膜20の構成を示す概略断面図である。この半導体光素子では、導波層10（等価屈折率 $n_c = 3.37$ ）の端面部に、アルミナの第1層膜11（屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 $O d_2$ ）、酸化タンタルの第2層膜12（屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 $A d_1$ ）、アルミナの第3層膜13（屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 $A d_2$ ）、酸化タンタルの第4層膜14（屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 $B d_1$ ）、アルミナの第5層膜15（屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 $B d_2$ ）、酸化タンタルの第6層膜16（屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 $C d_1$ ）、アルミナの第7層膜17（屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 $C d_2$ ）が順に積層されている。また、第7層膜17は大気等の自由空間5と接している。

【0028】

この半導体光素子の端面部に設けられた7層反射膜20の反射特性について説明する。まず、設定波長 $\lambda = 980\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を2%とする。各パラメータを、 $O = 0.2$ 、 $A = 2.2$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ とした場合、酸化タンタル及びアルミナの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 が、それぞれ $\phi_1 = 0.45844$ 、 $\phi_2 = 1.14932$ である場合に波長 980 nm で反射率2%が得られる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 22.13\text{ nm} / 76.47\text{ nm} / 243.44\text{ nm} / 69.52\text{ nm} / 221.31\text{ nm} / 69.52\text{ nm} / 221.31\text{ nm}$ である。全体の膜厚（ $d_{total} = \sum d_i$ ）は 923.7 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1590.57 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長（ $= 245\text{ nm}$ ）の約6.49倍と非常に厚い。即ち、導波する光の所定波長 980 nm について、その $5/4$ 波長よりも厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0029】

図6は、この7層反射膜20の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。ここで設定反射率のおよそ $+1\%$ が目標反射率である。この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって目標反射率の3%前後の平坦部分が得られている。即ち、波長 968 nm から 1210 nm にわたって反射率は極小値の1.3%から4.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率2.0%を基準として、 -1.0% から $+2.0\%$ の範囲、即ち、 $1.0\% \sim 4.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 242 nm である。この波長帯域幅を設定波長 λ （ $= 980\text{ nm}$ ）で割った値は約 0.246 である。

【0030】

ここで、比較のために導波光の所定波長 980 nm について $5/4$ 波長の厚さの仮想単層反射膜を仮定する。設定条件は、波長 980 nm で極小反射率4%をとるように、 $n_c = 3.37$ 、 $n_1 = 1.449$ である。この場合、極小反射率を基準として $+2\%$ 、すなわち反射率4%～6%の波長範囲は $951\text{ nm} \sim 1011\text{ nm}$ であり、その波長帯域幅は 60 nm である。この波長帯域幅の広さの目安として、導波光の所定波長 980 nm で割ると 0.061 が得られる。

【0031】

そこで、この実施の形態1に係る7層反射膜について、上記仮想単層反射膜と比較すると、導波光の波長での反射率+2%となる波長帯域幅をその波長で割った商は、0.246であり、仮想単層反射膜の0.061よりはるかに大きい。したがって、この7層反射膜は上述のように導波光の所定波長980nmについて5/4波長より厚い膜厚であるにもかかわらず、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0032】

実施の形態2.

本発明の実施の形態2に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図7を用いて説明する。図7は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、多層膜の構成において共通するが、設定波長 λ が879nmで設定反射率R(λ)を2.0%としている点で相違する。各パラメータを、O=0.2、A=2.2、B=2.0、C=2.0とした場合、酸化タンタル及びアルミナの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 が、それぞれ $\phi_1=0.45844$ 、 $\phi_2=1.14932$ である場合に波長879nmで反射率2%が得られる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 19.85\text{ nm} / 68.59\text{ nm} / 218.35\text{ nm} / 62.36\text{ nm} / 198.50\text{ nm} / 62.36\text{ nm} / 198.50\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{\text{total}} = \sum d_i$)は828.51nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1426.66nmであり、所定波長980nmについて1/4波長(=245nm)の約5.82倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0033】

図7は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の3%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長861nmから1098nmにわたって反射率は極小値の1.3%から4.0%の範囲内に収まっている。この場合、導波光の所定波長980nmを略中心として平坦部分が得られる。また、設定波長879nmの反射率2.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、1.0%~4.0%の範囲の連続した波長帯域幅 $\Delta\lambda$ は237nmである。この波長帯域幅を設定波長879nmで割った値は約0.270であり、仮想単層反射膜の場合の0.061より大きい。そこで、この7層反射膜は、上述のように導波光の所定波長980nmについて5/4波長より厚い膜厚であるにもかかわらず、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。なお、ここで「所定波長」とは、導波層を導波する光の波長であって、この場合には980nmの光としている。一方、「設定波長」とは、上記所定波長を低反射率の平坦部の略中心となるように設定する波長である。

【0034】

次に、極小反射率を基準として+2.0%となる波長帯域の広さについて、この7層反射膜と仮想単層反射膜とを比較検討する。この7層反射膜の極小反射率は1.3%である。そこで、極小反射率を基準として+2.0%となる波長範囲、つまり反射率3.3%以下の範囲は波長866nmから1089nmである。即ち、波長帯域幅としては223nmである。一方、仮想単層反射膜によって同一の極小反射率を実現しようとする場合、実効屈折率 $n_c = 3.37$ であるので、単層膜の屈折率 n_f は1.637又は2.058とすればよい。例えば、図8に屈折率 $n_f = 1.637$ であって、膜厚 $d = 5\lambda / (4n_f)$ の仮想単層反射膜の波長依存性を示す。この仮想単層反射膜の極小反射率1.3%を基準として極小反射率+2.0%以内となる範囲は、波長952nmから1009nmである。即ち、波長帯域幅としては57nmである。したがって、7層反射膜は、膜厚 $d = 5\lambda / (4n_f)$ の仮想単層反射膜に比べて低反射率の波長帯域が非常に広い。

【0035】

実施の形態3.

本発明の実施の形態3に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図9を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を3.0%としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.2, A = 2.4, B = 2.0, C = 2.0$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.518834, \phi_2 = 0.789695$ とすることによって波長 980 nm で反射率3.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 15.21\text{ nm} / 94.42\text{ nm} / 182.47\text{ nm} / 78.68\text{ nm} / 152.06\text{ nm} / 78.68\text{ nm} / 152.06\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は 753.58 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1330.83 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長($= 245\text{ nm}$)の約5.43倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0036】

図9は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の3%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 841 nm から 1014 nm にわたって反射率は2.5%から5.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率3.0%を基準として、 -1.0% から $+2.0\%$ の範囲、即ち、 $2.0\% \sim 5.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 173 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.177 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0037】

実施の形態4：

本発明の実施の形態4に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図10を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態3に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1035\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を3.0%としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.2, A = 2.4, B = 2.0, C = 2.0$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.518834, \phi_2 = 0.789695$ とすることによって波長 1035 nm で反射率3.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 16.06\text{ nm} / 99.72\text{ nm} / 192.72\text{ nm} / 83.10\text{ nm} / 160.60\text{ nm} / 83.10\text{ nm} / 160.60\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は 795.9 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1405.57 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長($= 258.75\text{ nm}$)の約5.43倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0038】

図10は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の3%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 888 nm から 1071 nm にわたって反射率は2.5%から5.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長 1035 nm の設定反射率3.0%を基準として、 -1.0% から $+2.0\%$ の範囲、即ち、 $2.0\% \sim 5.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 183 nm である。この波長帯域幅を設定波長 1035 nm で割った値は約 0.177 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0039】

実施の形態5：

本発明の実施の形態5に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図11を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を4.0%としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.15, A = 2.5, B = 2.0, C = 2.0$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.52082, \phi_2 = 0.767337$ とすることによって波長 980 nm で反射率4.0%とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 11.08\text{ nm} / 98.73\text{ nm} / 184.70\text{ nm} / 78.98\text{ nm} / 147.76\text{ nm} / 78.98\text{ nm} / 147.76\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は 747.99 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1323.92 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長($= 245\text{ nm}$)の約5.40倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0040】

図11は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の5%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 834 nm から 10121 nm にわたって反射率は3.5%から6.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の設定反射率4.0%を基準として、 -1.0% から $+2.0\%$ の範囲、即ち、 $3.0\% \sim 6.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 178 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.182 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0041】

実施の形態6.

本発明の実施の形態6に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図12を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態5に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1040\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を4.0%としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.15, A = 2.5, B = 2.0, C = 2.0$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.52082, \phi_2 = 0.767337$ とすることによって波長 1040 nm で反射率4.0%とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 11.76\text{ nm} / 104.77\text{ nm} / 196.00\text{ nm} / 83.82\text{ nm} / 156.80\text{ nm} / 83.82\text{ nm} / 156.80\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は 793.77 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1404.95 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長($= 245\text{ nm}$)の約5.73倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0042】

図12は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の5%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 885 nm から 1074 nm にわたって反射率は3.5%から6.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長 1040 nm の設定反射率4.0%を基準として、 -1.0% から $+2.0\%$ の範囲、即ち、 $3.0\% \sim 6.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 189 nm である。この波長帯域幅を設定波長 1040 nm で割った値は約 0.182 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0043】

実施の形態7.

本発明の実施の形態7に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図13を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、設定波長980nmで目標反射率5.0%としている点で相違する。また、パラメータはO=0.15、A=2.5、B=2.0、C=2.0としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.541022$ 、 $\phi_2 = 0.741397$ とすることによって波長980nmで反射率5.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 10.71\text{nm} / 102.56\text{nm} / 178.45\text{nm} / 82.05\text{nm} / 142.76\text{nm} / 82.05\text{nm} / 142.76\text{nm}$ である。全体の膜厚(d_{tot})は 741.34nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1391.41nm であり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約5.38倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0044】

図13は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の6%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長843nmから1013nmにわたって反射率は4.6%から7.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980nmの設定反射率5.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、4.0%～7.0%の範囲の連続した波長帯域幅は170nmである。この波長帯域幅を設定波長980nmで割った値は約0.173であり、仮想単層反射膜の場合の0.061より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0045】

実施の形態8.

本発明の実施の形態8に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図14を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態7に係る半導体光素子と比較すると、設定波長1035nmで設定反射率5.0%としている点で相違する。また、パラメータはO=0.15、A=2.5、B=2.0、C=2.0としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.541022$ 、 $\phi_2 = 0.741397$ とすることによって波長1035nmで反射率5.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 11.31\text{nm} / 108.31\text{nm} / 188.47\text{nm} / 86.65\text{nm} / 150.77\text{nm} / 86.65\text{nm} / 150.77\text{nm}$ である。全体の膜厚(d_{tot})は 782.93nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1391.41nm であり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約5.68倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0046】

図14は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の6%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長890nmから1070nmにわたって反射率は4.6%から7.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長1035nmの設定反射率5.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、4.0%～7.0%の範囲の連続した波長帯域幅は170nmである。この波長帯域幅を設定波長1035nmで割った値は約0.164であり、仮想単層反射膜の場合の0.061より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0047】

実施の形態9.

本発明の実施の形態9に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図15及び図16を用いて説明する。図15は、この半導体光素子の端面部の反射膜として、第1層膜に酸化タンタル膜を用いた7層反射膜30を設けた場合の構成を示す概略断面図である。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、7層反射膜30が導波層10側から酸化タンタル21／アルミナ22／酸化タンタル23／アルミナ24／酸化タンタル25／アルミナ26／酸化タンタル27の順に積層されており、導波層10側の第1層膜21が酸化タンタルである点で相違する。具体的には、7層反射膜30は、導波層10側から順に、酸化タンタルの第1層膜21（屈折率 $n_2 = 2.037$ 、膜厚 $O d_2$ ）、アルミナの第2層膜22（屈折率 $n_1 = 1.62$ 、膜厚 $A d_1$ ）、酸化タンタルの第3層膜23（屈折率 $n_2 = 2.037$ 、膜厚 $A d_2$ ）、アルミナの第4層膜24（屈折率 $n_1 = 1.62$ 、膜厚 $B d_1$ ）、酸化タンタルの第5層膜25（屈折率 $n_2 = 2.037$ 、膜厚 $B d_2$ ）、アルミナの第6層膜26（屈折率 $n_1 = 1.62$ 、膜厚 $C d_1$ ）、酸化タンタルの第7層膜27（屈折率 $n_2 = 2.037$ 、膜厚 $C d_2$ ）とが積層されている。なお、アルミナと酸化タンタルとが交互に積層されている点で実施の形態1に係る半導体光素子と共通する。

【0048】

この半導体光素子の端面部の7層反射膜30において、設定波長 $\lambda = 980\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を2.0%とする。この場合、各パラメータを $O = 1.15$ 、 $A = 1.82$ 、 $B = 1.97$ 、 $C = 2.06$ とすると、アルミナ及び酸化タンタルの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 がそれぞれ $\phi_1 = 0.645821$ 、 $\phi_2 = 1.452041$ の場合に波長980nmで反射率を2%とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 126.62\text{ nm} / 113.17\text{ nm} / 200.38\text{ nm} / 122.49\text{ nm} / 216.90\text{ nm} / 128.09\text{ nm} / 226.81\text{ nm}$ である。全体の膜厚（ $d_{total} = \sum d_i$ ）は1134.46nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、2174.63nmであり、所定波長980nmの1/4波長（=245nm）の約8.88倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0049】

図16は、この7層反射膜30の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の3%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長996nmから1119nmにわたって反射率は1.5%から4.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980nmの設定反射率2.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、1.0%～4.0%の範囲の連続した波長帯域幅は157nmである。この波長帯域幅を設定波長980nmで割った値は約0.160であり、仮想単層反射膜の場合の0.061より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0050】

実施の形態10.

本発明の実施の形態10に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図17を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態9に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 908\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を2.0%としている点で相違する。また、パラメータは $O = 1.15$ 、 $A = 1.82$ 、 $B = 1.97$ 、 $C = 2.06$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.645821$ 、 $\phi_2 = 1.452041$ とすることによって波長908nmで反射率2.0%とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 117.31\text{ nm} / 104.85\text{ nm} / 185.66\text{ nm} / 113.49\text{ nm} / 200.96\text{ nm} / 118.68\text{ nm} / 210.14\text{ nm}$ である。全体の膜厚（ $d_{total} = \sum d_i$ ）は1051.09nmである。それぞれの膜

の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、2014.81 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245$ nm) の約 8.22 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0051】

図17は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の3%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 924 nm から 1037 nm にわたって反射率は 1.5% から 4.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 908 nm の設定反射率 2.0% を基準として、-1.0% から +2.0% の範囲、即ち、1.0% ~ 4.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 145 nm である。この波長帯域幅を設定波長 908 nm で割った値は約 0.160 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0052】

実施の形態11.

本発明の実施の形態11に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図18を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態9に係る半導体光素子と比較すると、多層反射膜の構成において共通するが、設定波長 $\lambda = 980$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 3.0% としている点で相違する。また、パラメータは $O = 1.15, A = 1.82, B = 1.97, C = 2.06$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.893399, \phi_2 = 1.26984$ とすることによって波長 980 nm で反射率 3.0% とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 110.73$ nm / 156.55 nm / 175.24 nm / 169.45 nm / 189.68 nm / 177.19 nm / 198.35 nm である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 1177.19 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、2201.59 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245$ nm) の約 8.99 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0053】

図18は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の約 4% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 962 nm から 1053 nm にわたって反射率は 2.6% から 5.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の設定反射率 3.0% を基準として、-1.0% から +2.0% の範囲、即ち、2.0% ~ 5.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 91 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.093 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0054】

実施の形態12.

本発明の実施の形態12に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図19を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態11に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 953$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 3.0% としている点で相違する。また、パラメータは $O = 1.15, A = 1.82, B = 1.97, C = 2.06$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.893399, \phi_2 = 1.26984$ とすることによって波長 953 nm で反射率 3.0% とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 103.16$ nm / 145.85 nm / 163.26 nm / 157.87 nm / 176.72 nm / 165.08 nm / 184.79 nm で

ある。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 1096.73 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i の積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、2140.93 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 8.74 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0055】

図 19 は、この 7 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、目標反射率の約 4 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 962 nm から 1053 nm にわたって反射率は 2.6 % から 5.0 % の範囲内に収まっている。また、設定波長 953 nm の設定反射率 3.0 % を基準として、-1.0 % から +2.0 % の範囲、即ち、2.0 % ~ 5.0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 89 nm である。この波長帯域幅を設定波長 953 nm で割った値は約 0.093 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この 7 層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0056】

実施の形態 13.

本発明の実施の形態 13 に係る 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 20 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 9 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 4.0 % としている点で相違する。また、パラメータは $O = 1.09$ 、 $A = 1.80$ 、 $B = 1.98$ 、 $C = 2.05$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 は、 $\phi_1 = 0.922613$ 、 $\phi_2 = 1.26872$ とすることによって波長 980 nm で反射率 4.0 % とすることができます。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 104.86\text{ nm} / 159.89\text{ nm} / 173.16\text{ nm} / 175.88\text{ nm} / 190.48\text{ nm} / 182.99\text{ nm} / 198.17\text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 1185.43 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i の積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、2211.73 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 9.03 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制することができる。

【0057】

図 20 は、この 7 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、目標反射率の約 5 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、反射率は 3.7 % から 6.0 % の範囲内に収まっている。また、波長 980 nm の設定反射率 4.0 % を基準として、-1.0 % から +2.0 % の範囲、即ち、3.0 % ~ 6.0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 190 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.093 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この 7 層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0058】

実施の形態 14.

本発明の実施の形態 14 に係る 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 21 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 13 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 912$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 4.0 % としている点で相違する。また、パラメータは $O = 1.09$ 、 $A = 1.80$ 、 $B = 1.98$ 、 $C = 2.05$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.922613$ 、 $\phi_2 = 1.26872$ とすることによって波長 912 nm で反射率 4.0 % とすることができます。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 97.58\text{ nm} / 148.80\text{ nm} / 161.15\text{ nm} / 163.68\text{ nm} / 177.26\text{ nm} / 170.29\text{ nm} / 184.42\text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 1103.18 nm である。それぞれの膜の

屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、2059.26 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245$ nm) の約 8.41 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0059】

図21は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の約5%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 891 nm から 1069 nm にわたって反射率は 3.7% から 6.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 912 nm の設定反射率 4.0% を基準として、-1.0% から +2.0% の範囲、即ち、3.0% ~ 6.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 178 nm である。この波長帯域幅を設定波長 912 nm で割った値は約 0.195 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0060】

実施の形態15.

本発明の実施の形態15に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図22を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態9に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 5.0% としている点で相違する。また、パラメータは $O = 1.13$ 、 $A = 1.76$ 、 $B = 1.98$ 、 $C = 2.06$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1.0252$ 、 $\phi_2 = 1.18958$ とすることによって波長 980 nm で反射率 5.0% とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 101.93$ nm / 173.72 nm / 158.75 nm / 195.44 nm / 178.60 nm / 203.33 nm / 185.81 nm である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 1103.18 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、2213.24 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245$ nm) の約 9.03 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0061】

図22は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の約6%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、反射率は 4.7% から 7.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の設定反射率 5.0% を基準として、-1.0% から +2.0% の範囲、即ち、4.0% ~ 7.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 190 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.194 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0062】

実施の形態16.

本発明の実施の形態16に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図23を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態15に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 910$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 5.0% としている点で相違する。また、パラメータは $O = 1.13$ 、 $A = 1.76$ 、 $B = 1.98$ 、 $C = 2.06$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1.0252$ 、 $\phi_2 = 1.18958$ とすることによって波長 910 nm で反射率 5.0% とすることができる。それに伴って、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 94.65$ nm / 161.31 nm / 147.41 nm / 181.48 nm / 165.84 nm / 188.81 nm / 172.54 nm である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 1112.04 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、2055.16 nm で

あり、所定波長980 nmの1/4波長 (=245 nm) の約8.39倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0063】

図23は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の約6%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長891 nmから1068 nmにわたって反射率は4.7%から7.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長910 nmの設定反射率5.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、4.0%～7.0%の範囲の連続した波長帯域幅は177 nmである。この波長帯域幅を設定波長910 nmで割った値は約0.195であり、仮想单層反射膜の場合の0.061より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0064】

以下に、実施の形態1から実施の形態16に係る半導体光素子の多層反射膜の特性について、表1に示した。表1には、多層反射膜の特性として、多層反射膜の構成、設定波長 λ 及び設定反射率 $R(\lambda)$ 、極小反射率、 $\sum n_i d_i$ 及び所定波長980 nmの1/4波長(245 nm)との対比、 $R(\lambda)$ の-1.0～+2.0%の範囲となる波長帯域幅 $\Delta\lambda$ 、 $\Delta\lambda/\lambda$ について示した。

【0065】

【表1】

表1

多層反射膜の特性						
実施の形態	多層反射膜の構成	設定波長 λ 設定反射率 $R(\lambda)$	極小反射率	$\sum n_i d_i$ 、 波長 980nm の 1/4 波長 (245nm) との対比	$R(\lambda)$ の -1.0~2.0% となる波長 帯域 $\Delta \lambda$	$\Delta \lambda / \lambda$
1	7層膜	980nm 2%	1.3%	1590.57nm 6.49倍	242nm	242/980=0.246
2	7層膜	879nm 2%	1.3%	1426.66nm 5.82倍	237nm	237/879=0.270
3	7層膜	980nm 3%	2.5%	1330.83nm 5.43倍	173nm	173/980=0.177
4	7層膜	1035nm 3%	2.5%	1405.57nm 5.74倍	183nm	183/1035=0.177
5	7層膜	980nm 4%	3.5%	1323.92nm 5.40倍	178nm	178/980=0.182
6	7層膜	1040nm 4%	3.5%	1405.95nm 5.73倍	189nm	189/1040=0.182
7	7層膜	980nm 5%	4.6%	1391.41nm 5.38倍	170nm	170/980=0.173
8	7層膜	1035nm 5%	4.6%	1391.41nm 5.68倍	170nm	170/1035=0.164
9	7層膜	980nm 2%	1.5%	2174.63nm 8.88倍	157nm	157/980=0.160
10	7層膜	908nm 2%	1.5%	2014.81nm 8.22倍	145nm	145/908=0.160
11	7層膜	980nm 3%	2.6%	2201.59nm 8.99倍	91nm	91/980=0.093
12	7層膜	953nm 3%	2.6%	2140.93nm 8.74倍	89nm	89/953=0.093
13	7層膜	980nm 4%	3.7%	2211.73nm 9.03倍	190nm	190/980=0.194
14	7層膜	912nm 4%	3.7%	2059.26nm 8.41倍	178nm	178/912=0.195
15	7層膜	980nm 5%	4.7%	2213.24nm 9.03倍	190nm	190/980=0.194
16	7層膜	910nm 5%	4.7%	2055.16nm 8.89倍	177nm	177/910=0.195

【0066】

実施の形態17.

本発明の実施の形態17に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について図24及び図25を用いて説明する。図24は、半導体光素子の端面部の反射膜として、単層反射膜に代えて6層反射膜40を設けた場合の構成を示す概略断面図である。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、多層反射膜が6層反射膜40で構成されている点で相違する。この6層反射膜40の反射率が所定波長で前記仮想単層膜の反射率と同一に設定する条件について検討する。6層反射膜40の場合にも上記7層反射膜と同様に、振幅反射率は下記式(13)で表される。

【数14】

$$r = \frac{(m_{11} + m_{12})n_c - (m_{21} + m_{22})}{(m_{11} + m_{12})n_c + (m_{21} + m_{22})} \quad (13)$$

【0067】

ここで、 $m_{i,j}$ (i, j は 1 又は 2) は下記式 (14) で表される。

【数15】

$$\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos A\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin A\phi_1 \\ -in_1 \sin A\phi_1 & \cos A\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos A\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin A\phi_2 \\ -in_2 \sin A\phi_2 & \cos A\phi_2 \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} \cos B\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin B\phi_1 \\ -in_1 \sin B\phi_1 & \cos B\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos B\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin B\phi_2 \\ -in_2 \sin B\phi_2 & \cos B\phi_2 \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} \cos C\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin C\phi_1 \\ -in_1 \sin C\phi_1 & \cos C\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos C\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin C\phi_2 \\ -in_2 \sin C\phi_2 & \cos C\phi_2 \end{pmatrix} \quad (14)$$

なお、A, B, C は、第1層膜 3 1 の膜厚 A d 1、第2層膜 3 2 の膜厚 A d 2、第3層膜 3 3 の膜厚 B d 1、第4層膜 3 4 の膜厚 B d 2、第5層膜 3 5 の膜厚 C d 1、第6層膜 3 6 の膜厚 C d 2 とした場合の、それぞれの2層膜（ペア）の寄与率を表すパラメータである。

【0068】

以下、半導体光素子の端面部に6層反射膜 4 0 を設けた場合について説明する。図24は、端面部に設けた6層反射膜 4 0 の構成を示す概略断面図である。この半導体光素子では、導波層 1 0 (等価屈折率 $n_c = 3.37$) の端面部に順に、酸化タンタルの第1層膜 3 1 (屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 A d 1)、アルミナの第2層膜 3 2 (屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 A d 2)、酸化タンタルの第3層膜 3 3 (屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 B d 1)、アルミナの第4層膜 3 4 (屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 B d 2)、酸化タンタルの第5層膜 3 5 (屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 C d 1)、アルミナの第6層膜 3 6 (屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 C d 2) が積層されている。さらに、この6層反射膜 4 0 は、空気等の自由空間 5 に接している。

【0069】

この半導体光素子の端面部の6層反射膜 4 0 の反射特性について説明する。まず、設定波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 2 % とする。各パラメータを、A = 2.0、B = 2.0、C = 2.0 とした場合、酸化タンタル及びアルミナの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 が、それぞれ $\phi_1 = 0.792828$ 、 $\phi_2 = 0.715471$ である場合に反射率 2 % が得られる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 120.23 \text{ nm} / 137.77 \text{ nm} / 120.23 \text{ nm} / 137.77 \text{ nm} / 120.23 \text{ nm} / 137.77 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 774.0 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1411.50 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245 \text{ nm}$) の約 5.76 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0070】

図25は、この6層反射膜 4 0 の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、目標反射率の 3 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 877 nm から 1017 nm にわたって反射率は極小値の 1.4 % から 4.0 % の範囲内に収まっている。また、所定波長 980 nm の反射率 2.0 % を基準として、-1.0 % から +2.0 % の範囲、即ち、

1. 0 %～4. 0 %の範囲の連続した波長帯域幅は140 nmである。この波長帯域幅を所定波長980 nmで割った値は約0. 143であり、仮想単層反射膜の場合の0. 061より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0071】

実施の形態18.

本発明の実施の形態18に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図26を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態17に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1014$ nmで設定反射率 $R(\lambda)$ を2. 0 %としている点で相違する。また、パラメータは $A = 2. 0$ 、 $B = 2. 0$ 、 $C = 2. 0$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0. 792828$ 、 $\phi_2 = 0. 715471$ とすることによって波長1014 nmで反射率2. 0 %とすることができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 124. 40$ nm / 142. 55 nm / 124. 40 nm / 142. 55 nm / 124. 40 nm / 142. 55 nmである。全体の膜厚($d_{tot, total} = \sum d_i$)は800. 85 nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1460. 47 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長(=245 nm)の約5. 96倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0072】

図26は、この6層反射膜40の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、目標反射率の約3 %前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長907 nmから1053 nmにわたって反射率は1. 4 %から4. 0 %の範囲内に収まっている。また、設定波長1014 nmの設定反射率2. 0 %を基準として、-1. 0 %から+2. 0 %の範囲、即ち、1. 0 %～4. 0 %の範囲の連続した波長帯域幅は146 nmである。この波長帯域幅を設定波長1014 nmで割った値は約0. 144であり、仮想単層反射膜の場合の0. 061より大きい。そこで、この6層反射膜40は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0073】

実施の形態19.

本発明の実施の形態19に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図27を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態17に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980$ nmで設定反射率 $R(\lambda)$ を3. 0 %としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1. 94$ 、 $B = 1. 90$ 、 $C = 2. 2$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0. 948585$ 、 $\phi_2 = 0. 476939$ とすることによって波長980 nmで反射率3. 0 %とすることができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 139. 54$ nm / 89. 08 nm / 136. 66 nm / 87. 25 nm / 158. 24 nm / 101. 02 nmである。全体の膜厚($d_{tot, total} = \sum d_i$)は711. 79 nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1342. 95 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長(=245 nm)の約5. 48倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0074】

図27は、この6層反射膜40の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、目標反射率の約4 %前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長806 nmから1009 nmにわたって反射率は2. 3 %から5. 0 %の範囲内に収まっている。また、設定波長980 nmの設定反射率3. 0 %を基準として、-1. 0 %から+2. 0 %の範囲、即ち、2

0 %～5. 0 %の範囲の連続した波長帯域幅は203 nmである。この波長帯域幅を設定波長980 nmで割った値は約0. 207であり、仮想単層反射膜の場合の0. 061より大きい。そこで、この6層反射膜40は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0075】

実施の形態20.

本発明の実施の形態20に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図28を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態19に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1052$ nmで設定反射率 $R(\lambda)$ を3. 0 %としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1. 94$ 、 $B = 1. 90$ 、 $C = 2. 2$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0. 948585$ 、 $\phi_2 = 0. 476939$ とすることによって波長1052 nmで反射率3. 0 %とすることができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 150. 64$ nm / 96. 17 nm / 147. 54 nm / 94. 19 nm / 170. 83 nm / 109. 06 nmである。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は768. 43 nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1449. 81 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長(=245 nm)の約5. 92倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0076】

図28は、この6層反射膜40の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、目標反射率の約4 %前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、反射率は2. 3 %から5. 0 %の範囲内に収まっている。また、設定波長1052 nmの設定反射率3. 0 %を基準として、-1. 0 %から+2. 0 %の範囲、即ち、2. 0 %～5. 0 %の範囲の連続した波長帯域幅は218 nmである。この波長帯域幅を設定波長1052 nmで割った値は約0. 207であり、仮想単層反射膜の場合の0. 061より大きい。そこで、この6層反射膜40は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0077】

実施の形態21.

本発明の実施の形態21に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図29を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態17に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980$ nmで設定反射率 $R(\lambda)$ を4. 0 %としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1. 94$ 、 $B = 1. 90$ 、 $C = 2. 2$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0. 98561$ 、 $\phi_2 = 0. 417545$ とすることによって波長980 nmで反射率4. 0 %とことができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 144. 98$ nm / 77. 99 nm / 141. 99 nm / 76. 38 nm / 164. 41 nm / 188. 44 nmである。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は794. 19 nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1483. 84 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長(=245 nm)の約6. 06倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0078】

図29は、この6層反射膜40の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、目標反射率の約5 %前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長791 nmから1020 nmにわたって反射率は3. 3 %から6. 0 %の範囲内に収まっている。また、設定波長980 nmの設定反射率4. 0 %を基準として、-1. 0 %から+2. 0 %の範囲、即ち、3. 0 %～6. 0 %の範囲の連続した波長帯域幅は229 nmである。この波長帯域幅を設

定波長980 nmで割った値は約0.234であり、仮想単層反射膜の場合の0.061より大きい。そこで、この6層反射膜40は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0079】

実施の形態22.

本発明の実施の形態22に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図30を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態21に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1075$ nmで設定反射率R(λ)を4.0%としている点で相違する。また、パラメータはA=1.94、B=1.90、C=2.2としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.98561$ 、 $\phi_2 = 0.417545$ とすることによって波長1075 nmで反射率4.0%とすることができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 159.04\text{ nm} / 85.55\text{ nm} / 155.76\text{ nm} / 83.79\text{ nm} / 180.35\text{ nm} / 97.02\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は761.51 nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1450.03 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長(=245 nm)の約5.92倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0080】

図30は、この6層反射膜40の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、目標反射率の約5%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長854 nmから1105 nmにわたって反射率は3.3%から6.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長1075 nmの設定反射率4.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、3.0%～6.0%の範囲の連続した波長帯域幅は251 nmである。この波長帯域幅を設定波長1075 nmで割った値は約0.233であり、仮想単層反射膜の場合の0.061より大きい。そこで、この6層反射膜40は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0081】

実施の形態23.

本発明の実施の形態23に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図31を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態17に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980$ nmで設定反射率R(λ)を5.0%としている点で相違する。また、パラメータはA=2.04、B=1.92、C=2.2としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.93793$ 、 $\phi_2 = 0.433879$ とすることによって波長980 nmで反射率5.0%とができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 145.08\text{ nm} / 85.22\text{ nm} / 136.55\text{ nm} / 80.21\text{ nm} / 156.46\text{ nm} / 91.90\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は695.42 nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1318.03 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長(=245 nm)の約5.38倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0082】

図31は、この6層反射膜40の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、目標反射率の約6%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長787 nmから1009 nmにわたって反射率は4.6%から7.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980 nmの設定反射率5.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、4.0%～7.0%の範囲の連続した波長帯域幅は222 nmである。この波長帯域幅を設

定波長980nmで割った値は約0.227であり、仮想単層反射膜の場合の0.061より大きい。そこで、この6層反射膜40は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0083】

実施の形態24.

本発明の実施の形態24に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図32を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態23に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1069\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を5.0%としている点で相違する。また、パラメータは $A = 2.04$ 、 $B = 1.92$ 、 $C = 2.2$ としている。さらに、アルミニナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.93793$ 、 $\phi_2 = 0.433879$ とすることによって波長1069nmで反射率5.0%とすることができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 158.26\text{ nm} / 92.96\text{ nm} / 148.95\text{ nm} / 87.49\text{ nm} / 170.67\text{ nm} / 100.25\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は758.58nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1437.73nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約5.87倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0084】

図32は、この6層反射膜40の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、目標反射率の約6%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長858nmから1101nmにわたって反射率は4.6%から7.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長1069nmの設定反射率5.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、4.0%～7.0%の範囲の連続した波長帯域幅は243nmである。この波長帯域幅を設定波長1069nmで割った値は約0.227であり、仮想単層反射膜の場合の0.061より大きい。そこで、この6層反射膜40は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0085】

以下に、実施の形態17から実施の形態24に係る半導体光素子の多層反射膜の特性について、表2に示した。表2には、多層反射膜の特性として、多層反射膜の構成、設定波長 λ 及び設定反射率 $R(\lambda)$ 、極小反射率、 $\sum n_i d_i$ 及び所定波長980nmの1/4波長(245nm)との対比、 $R(\lambda)$ の-1.0～+2.0%の範囲となる波長帯域幅 $\Delta\lambda$ 、 $\Delta\lambda/\lambda$ について示した。

【0086】

【表2】

表2

実施の形態	多層反射膜の特性						
	多層反射膜の構成	設定波長λ	設定反射率R(λ)	極小反射率	$\sum n_i d_i$ 、波長980nmの1/4波長(245nm)との対比	R(λ)の-1.0~2.0%となる波長帯域Δλ	Δλ/λ
17	6層膜	980nm 2%	1.4%	1411.50nm 5.76倍	140nm	140/980=0.143	
18	6層膜	1014nm 2%	1.4%	1460.47nm 5.96倍	146nm	146/1014=0.144	
19	6層膜	980nm 3%	2.3%	1342.95nm 5.48倍	203nm	203/980=0.207	
20	6層膜	1014nm 3%	2.3%	1449.81nm 5.92倍	218nm	218/1014=0.207	
21	6層膜	980nm 4%	3.3%	1483.84nm 6.06倍	229nm	229/980=0.234	
22	6層膜	1075nm 4%	3.3%	1450.03nm 5.92倍	251nm	251/1075=0.233	
23	6層膜	980nm 5%	4.6%	1318.03nm 5.38倍	222nm	222/980=0.227	
24	6層膜	1069nm 5%	4.6%	1437.73nm 5.87倍	243nm	243/1069=0.164	

【0087】

実施の形態25.

本発明の実施の形態25に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について図33及び図34を用いて説明する。図33は、半導体光素子の端面部の反射膜として、単層反射膜に代えて3種類の膜からなる7層反射膜50を設けた場合の構成を示す概略断面図である。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、多層反射膜が3種類の膜からなる7層反射膜50で構成されている点で相違する。さらに詳細には、導波層10に接する第1層膜が窒化アルミニウム膜41である点で相違する。なお、第2層膜から第7層膜にかけては酸化タンタル及びアルミナが交互に積層されている点で共通する。

【0088】

この3種類の膜を含む7層反射膜50の反射率が所定波長で上記仮想単層膜の反射率と同一に設定する条件について検討する。ここでは、導波層10に接する第1層膜に第3の種類の膜を用いた場合について検討する。この第3の膜の位相変化 ϕ_3 は、下記式(15)で表される。

【数16】

$$\phi_3 = \frac{2\pi}{\lambda} n_3 d_3 \quad (15)$$

【0089】

そこで、この3種類の膜からなる7層反射膜50の振幅反射率は、上記7層反射膜、6層反射膜と同様に下記式(16)で表される。

【数17】

$$r = \frac{(m_{11} + m_{12})n_c - (m_{21} + m_{22})}{(m_{11} + m_{12})n_c + (m_{21} + m_{22})} \quad (16)$$

【0090】

ここで、 $m_{i,j}$ (i, j は 1 又は 2) は下記式 (17) で表される。

【数18】

$$\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi_3 & -\frac{i}{n_3} \sin \phi_3 \\ -in_3 \sin \phi_3 & \cos \phi_3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos A\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin A\phi_1 \\ -in_1 \sin A\phi_1 & \cos A\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos A\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin A\phi_2 \\ -in_2 \sin A\phi_2 & \cos A\phi_2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos B\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin B\phi_1 \\ -in_1 \sin B\phi_1 & \cos B\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos B\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin B\phi_2 \\ -in_2 \sin B\phi_2 & \cos B\phi_2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos C\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin C\phi_1 \\ -in_1 \sin C\phi_1 & \cos C\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos C\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin C\phi_2 \\ -in_2 \sin C\phi_2 & \cos C\phi_2 \end{pmatrix} \quad (17)$$

なお、A, B, C は、第2層膜 4 2 の膜厚 $A d_1$ 、第3層膜 4 3 の膜厚 $A d_2$ 、第4層膜 4 4 の膜厚 $B d_1$ 、第5層膜 4 5 の膜厚 $B d_2$ 、第6層膜 4 6 の膜厚 $C d_1$ 、第7層膜 4 7 の膜厚 $C d_2$ とした場合の、それぞれの2層膜（ペア）の寄与率を表すパラメータである。

【0091】

以下、半導体光素子の端面部に3種類の膜を含む7層反射膜 5 0 を設けた場合について説明する。図33は、端面部に設けた3種類の膜を含む7層反射膜の構成を示す概略断面図である。この半導体光素子では、導波層 1 0（等価屈折率 $n_c = 3.37$ ）の端面部に順に、窒化アルミニウム（AlN）の第1層膜 4 1（屈折率 $n_3 = 2.072$ 、膜厚 $d_3 = 50 \text{ nm}$ ）、酸化タンタルの第2層膜 4 2（屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 $A d_1$ ）、アルミナの第3層膜 4 3（屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 $A d_2$ ）、酸化タンタルの第4層膜 4 4（屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 $B d_1$ ）、アルミナの第5層膜 4 5（屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 $B d_2$ ）、酸化タンタルの第6層膜 4 6（屈折率 $n_1 = 2.057$ 、膜厚 $C d_1$ ）、アルミナの第7層膜 4 7（屈折率 $n_2 = 1.62$ 、膜厚 $C d_2$ ）が積層されている。さらに、この7層反射膜 5 0 は、空気等の自由空間 5 に接している。

【0092】

まず、窒化アルミニウム、酸化タンタル、アルミナの3種類の膜を含む7層反射膜の熱特性について説明する。この3種類の膜の熱伝導率は、順に、約 $1.8 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ 、約 $0.1 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ 、約 $0.2 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ なので、窒化アルミニウムが最も熱伝導率が高い。このため導波層 1 0 の熱を迅速に外部に放熱させることができる。

【0093】

次に、この半導体光素子の端面部の3種類の膜を含む7層反射膜 5 0 の反射特性について説明する。まず、設定波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 2.0% とする。各パラメータを、 $A = 1.0$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ とした場合、酸化タンタル及びアルミナの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 が、それぞれ $\phi_1 = 1.23574$ 、 $\phi_2 = 0.727856$ である場合に波長 980 nm で反射率 2% が得られる。なお、窒化アルミニウムの第1層膜 4 1 の厚み d_3 は予め 50 nm として、 ϕ_3 は既知の定数として用い、変数には ϕ_1 及び ϕ_2 のみを用いた。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3/A d_1/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2 = 50 \text{ nm}/93.7 \text{ nm}/70.08 \text{ nm}/18$

7. 40 nm/140. 15 nm/187. 40 nm/140. 15 nmである。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 868. 88 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1634. 92 nm であり、 $\lambda/4$ (= 245 nm) の約 6. 67 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0094】

図34は、この3種類の膜を含む7層反射膜50の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の3%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 952 nm から 1194 nm にわたって反射率は極小値の 1. 6% から 4. 0% の範囲内に収まっている。また、所定波長 980 nm の反射率 2. 0% を基準として、-1. 0% から +2. 0% の範囲、即ち、1. 0% ~ 4. 0% の範囲の連続した波長帯域幅は 242 nm である。この波長帯域幅を所定波長 980 nm で割った値は約 0. 247 であり、仮想单層反射膜の場合の 0. 061 より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0095】

実施の形態26.

本発明の実施の形態26に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図35を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態25と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 $\lambda = 897$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 2. 0% としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1. 0$ 、 $B = 2. 0$ 、 $C = 2. 0$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1. 23574$ 、 $\phi_2 = 0. 727856$ とすることによって波長 897 nm で反射率 2. 0% とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3/A d_1/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2 = 50/83. 26\text{ nm}/65. 10\text{ nm}/166. 52\text{ nm}/130. 20\text{ nm}/166. 52\text{ nm}/130. 20\text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 791. 8 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1487. 24 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (= 245 nm) の約 6. 07 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0096】

図35は、この3種類の膜を含む7層反射膜50の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の約 3% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 872 nm から 1086 nm にわたって反射率は 1. 5% から 4. 0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 897 nm の設定反射率 2. 0% を基準として、-1. 0% から +2. 0% の範囲、即ち、1. 0% ~ 4. 0% の範囲の連続した波長帯域幅は 214 nm である。この波長帯域幅を設定波長 897 nm で割った値は約 0. 239 であり、仮想单層反射膜の場合の 0. 061 より大きい。そこで、この7層反射膜50は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0097】

実施の形態27.

本発明の実施の形態27に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図36を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態25と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 $\lambda = 980$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 3. 0% としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1. 0$ 、 $B = 2. 0$ 、 $C = 2. 0$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1. 20275$ 、 $\phi_2 = 0. 765599$ とすることによって波長 980 nm で反射率 3. 0% とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3/A d_1/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2 = 50/91. 20\text{ nm}/73. 71\text{ nm}/1$

82. 40 nm / 147. 42 nm / 182. 40 nm / 147. 42 nm である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 874. 55 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1638. 64 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 6. 69 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0098】

図36は、この3種類の膜を含む7層反射膜50の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の約4%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 953 nm から 1195 nm にわたって反射率は 2. 6% から 5. 0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の設定反射率 3. 0% を基準として、-1. 0% から +2. 0% の範囲、即ち、2. 0% ~ 5. 0% の範囲の連続した波長帯域幅は 242 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0. 247 であり、仮想単層反射膜の場合の 0. 061 より大きい。そこで、この7層反射膜50は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0099】

実施の形態28。

本発明の実施の形態28に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図37を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態27と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 $\lambda = 896$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 3. 0% としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1. 0$ 、 $B = 2. 0$ 、 $C = 2. 0$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1. 23574$ 、 $\phi_2 = 0. 727856$ とすることによって波長 896 nm で反射率 3. 0% とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3 / Ad_1 / Ad_2 / Bd_1 / Bd_2 / Cd_1 / Cd_2 = 50 / 81. 08$ nm / 68. 15 nm / 162. 16 nm / 136. 31 nm / 162. 16 nm / 136. 31 nm である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 796. 17 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1489. 56 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 6. 08 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0100】

図37は、この3種類の膜を含む7層反射膜50の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の約4%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 872 nm から 1089 nm にわたって反射率は 2. 5% から 5. 0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 896 nm の設定反射率 3. 0% を基準として、-1. 0% から +2. 0% の範囲、即ち、2. 0% ~ 5. 0% の範囲の連続した波長帯域幅は 217 nm である。この波長帯域幅を設定波長 896 nm で割った値は約 0. 242 であり、仮想単層反射膜の場合の 0. 061 より大きい。そこで、この7層反射膜50は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0101】

実施の形態29。

本発明の実施の形態29に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図38を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態25と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 $\lambda = 980$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 4. 0% としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1. 0$ 、 $B = 2. 0$ 、 $C = 2. 0$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1. 17459$ 、 $\phi_2 = 0. 798874$ とすることによって波長 980 nm で反射率 4. 0% とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3 / Ad_1 / Ad_2 / Bd_1 / Bd_2 / Cd_1 / Cd_2 = 50 / 89. 06$ nm / 76. 91 nm / 1

78.13 nm/153.83 nm/178.13 nm/153.83 nmである。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 879.89 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1642.63 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 6.70 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0102】

図38は、この3種類の膜を含む7層反射膜50の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の約5%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 953 nm から 1198 nm にわたって反射率は 3.6% から 6.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の設定反射率 4.0% を基準として、-1.0% から +2.0% の範囲、即ち、3.0% ~ 6.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 245 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.250 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この7層反射膜50は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0103】

実施の形態30。

本発明の実施の形態30に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図39を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態29に係る半導体光素子と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 $\lambda = 893$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 4.0% としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.0$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1.14262$ 、 $\phi_2 = 0.805876$ とすることによって波長 893 nm で反射率 4.0% とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3/A d_1/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2 = 50/78.95\text{ nm}/70.70\text{ nm}/157.90\text{ nm}/141.40\text{ nm}/157.90\text{ nm}/141.40\text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 798.25 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1488.27 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 6.07 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0104】

図39は、この3種類の膜を含む7層反射膜50の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の約5%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 870 nm から 1090 nm にわたって反射率は 3.4% から 6.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 893 nm の設定反射率 4.0% を基準として、-1.0% から +2.0% の範囲、即ち、3.0% ~ 6.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 220 nm である。この波長帯域幅を設定波長 893 nm で割った値は約 0.246 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この7層反射膜50は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0105】

実施の形態31。

本発明の実施の形態31に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図40を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態25と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 $\lambda = 980$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 5.0% としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.0$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1.14888$ 、 $\phi_2 = 0.829916$ とすることによって波長 980 nm で反射率 5.0% とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3/A d_1/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2 = 50/87.11\text{ nm}/79.90\text{ nm}/1$

74. 23 nm / 159. 81 nm / 174. 23 nm / 159. 81 nm である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 885. 09 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1646. 79 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 6. 72 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0106】

図40は、この3種類の膜を含む7層反射膜50の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の約6%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 952 nm から 1201 nm にわたって反射率は 4. 6% から 7. 0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の設定反射率 5. 0% を基準として、-1. 0% から +2. 0% の範囲、即ち、4. 0% ~ 7. 0% の範囲の連続した波長帯域幅は 249 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0. 254 であり、仮想単層反射膜の場合の 0. 061 より大きい。そこで、この7層反射膜50は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0107】

実施の形態32。

本発明の実施の形態32に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図41を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態31と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 $\lambda = 890$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 5. 0% としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1. 0$ 、 $B = 2. 0$ 、 $C = 2. 0$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1. 11792$ 、 $\phi_2 = 0. 835299$ とすることによって波長 890 nm で反射率 5. 0% とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 50 / 76. 98 \text{ nm} / 73. 04 \text{ nm} / 153. 96 \text{ nm} / 146. 07 \text{ nm} / 153. 96 \text{ nm} / 146. 07 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 800. 08 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1486. 93 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 6. 07 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0108】

図41は、この3種類の膜を含む7層反射膜50の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の約6%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 867 nm から 1093 nm にわたって反射率は 4. 4% から 7. 0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 890 nm の設定反射率 5. 0% を基準として、-1. 0% から +2. 0% の範囲、即ち、4. 0% ~ 7. 0% の範囲の連続した波長帯域幅は 226 nm である。この波長帯域幅を設定波長 890 nm で割った値は約 0. 254 であり、仮想単層反射膜の場合の 0. 061 より大きい。そこで、この7層反射膜50は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0109】

以下に、実施の形態25から実施の形態32に係る半導体光素子の多層反射膜の特性について、表3に示した。表3には、多層反射膜の特性として、多層反射膜の構成、設定波長 λ 及び設定反射率 $R(\lambda)$ 、極小反射率、 $\sum n_i d_i$ 及び所定波長 980 nm の 1/4 波長 (245 nm) との対比、 $R(\lambda)$ の -1. 0 ~ +2. 0% の範囲となる波長帯域幅 $\Delta \lambda$ 、 $\Delta \lambda / \lambda$ について示した。

【0110】

【表3】

表3

実施の形態	多層反射膜の特性					
	多層反射膜の構成	設定波長λ	極小反射率	$\sum n_i d_i$ 、波長980nmの1/4波長(245nm)との対比	R(λ)の-1.0~2.0%となる波長帯域Δλ	$\Delta \lambda / \lambda$
25	7層膜(3種類)	980nm 2%	1.6%	1634.92nm 6.67倍	242nm	$242/980=0.247$
26	7層膜(3種類)	897nm 2%	1.5%	1487.24nm 6.07倍	214nm	$214/897=0.239$
27	7層膜(3種類)	980nm 3%	2.6%	1638.64nm 6.69倍	242nm	$242/980=0.247$
28	7層膜(3種類)	896nm 3%	2.5%	1489.56nm 6.08倍	217nm	$217/896=0.242$
29	7層膜(3種類)	980nm 4%	3.6%	1642.63nm 6.70倍	245nm	$245/980=0.250$
30	7層膜(3種類)	893nm 4%	3.4%	1488.27nm 6.07倍	220nm	$220/893=0.246$
31	7層膜(3種類)	980nm 5%	4.6%	1646.79nm 6.72倍	249nm	$249/980=0.254$
32	7層膜(3種類)	890nm 5%	4.4%	1486.93nm 6.07倍	226nm	$226/890=0.254$

【0111】

実施の形態33.

本発明の実施の形態33に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について図42及び43を用いて説明する。図42は、半導体光素子の端面部の反射膜として、単層反射膜に代えて9層反射膜60を設けた場合の構成を示す概略断面図である。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、多層反射膜が9層反射膜60で構成されている点で相違する。この9層反射膜60の反射率が所定波長で前記仮想単層膜の反射率と同一にする条件について検討する。9層反射膜60の振幅反射率は、上記4層反射膜及び7層反射膜と同様に下記式(18)で表される。

【数19】

$$r = \frac{(m_{11} + m_{12})n_c - (m_{21} + m_{22})}{(m_{11} + m_{12})n_c + (m_{21} + m_{22})} \quad (18)$$

【0112】

ここで、 $m_{i,j}$ (i, j は1又は2) は下記式(19)で表される。

【数20】

$$\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos O\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin O\phi_2 \\ -in_2 \sin O\phi_2 & \cos O\phi_2 \end{pmatrix} \\
 \times \begin{pmatrix} \cos A\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin A\phi_1 \\ -in_1 \sin A\phi_1 & \cos A\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos A\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin A\phi_2 \\ -in_2 \sin A\phi_2 & \cos A\phi_2 \end{pmatrix} \\
 \times \begin{pmatrix} \cos B\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin B\phi_1 \\ -in_1 \sin B\phi_1 & \cos B\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos B\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin B\phi_2 \\ -in_2 \sin B\phi_2 & \cos B\phi_2 \end{pmatrix} \\
 \times \begin{pmatrix} \cos C\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin C\phi_1 \\ -in_1 \sin C\phi_1 & \cos C\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos C\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin C\phi_2 \\ -in_2 \sin C\phi_2 & \cos C\phi_2 \end{pmatrix} \\
 \times \begin{pmatrix} \cos D\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin D\phi_1 \\ -in_1 \sin D\phi_1 & \cos D\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos D\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin D\phi_2 \\ -in_2 \sin D\phi_2 & \cos D\phi_2 \end{pmatrix} \quad (19)$$

なお、O, A, B, C, Dは、第1層膜51の膜厚O d₂、第2層膜52の膜厚A d₁、第3層膜63の膜厚A d₂、第4層膜54の膜厚B d₁、第5層膜55の膜厚B d₂、第6層膜56の膜厚C d₁、第7層膜57の膜厚C d₂、第8層膜58の膜厚D d₁、第9層膜59の膜厚D d₂において、第1層膜31を除き、それぞれの2層膜（ペア）の寄与率を表すパラメータである。

【0113】

以下、半導体光素子の端面部に9層反射膜60を設けた場合について説明する。図42は、端面部に設けた9層反射膜の構成を示す概略断面図である。この半導体光素子では、導波層10（等価屈折率n_c=3.37）の端面部に順に、アルミナの第1層膜51（屈折率n₂=1.62、膜厚O d₂）、酸化タンタルの第2層膜52（屈折率n₁=2.057、膜厚A d₁）、アルミナの第3層膜53（屈折率n₂=1.62、膜厚A d₂）、酸化タンタルの第4層膜54（屈折率n₁=2.057、膜厚B d₁）、アルミナの第5層膜55（屈折率n₂=1.62、膜厚B d₂）、酸化タンタルの第6層膜56（屈折率n₁=2.057、膜厚C d₁）、アルミナの第7層膜57（屈折率n₂=1.62、膜厚C d₂）、酸化タンタルの第8層膜58（屈折率n₁=2.057、膜厚C d₁）、アルミナの第9層膜59（屈折率n₂=1.62、膜厚C d₂）が積層されている。さらに、この9層反射膜60は、空気等の自由空間5に接している。

【0114】

この半導体光素子の端面部の9層反射膜60の反射特性について説明する。まず、設定波長λ=980 nmで設定反射率R(λ)を2%とする。各パラメータを、O=0.2、A=2.7、B=2.0、C=2.0、D=2.0とした場合、酸化タンタル及びアルミナの位相変化φ₁及びφ₂が、それぞれφ₁=0.35769、φ₂=0.958077である場合に波長980 nmで反射率2%が得られる。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は、O d₂ / A d₁ / A d₂ / B d₁ / B d₂ / C d₁ / C d₂ / D d₁ / D d₂ = 18.45 nm / 73.23 nm / 249.06 nm / 54.24 nm / 184.49 nm / 54.24 nm / 184.49 nm / 54.24 nm / 184.49 nmである。全体の膜厚(d_{total}=Σd_i)は1056.93 nmである。また、それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iは、1815.34 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長(=245 nm)の約7.41倍と非常に厚い。この

ため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0115】

図43は、この9層反射膜60の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、目標反射率の3%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長877nmから1007nmにわたって反射率は極小値の1.6%から4.0%の範囲内に収まっている。また、所定波長980nmの反射率2.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、1.0%~4.0%の範囲の連続した波長帯域幅は130nmである。この波長帯域幅を所定波長980nmで割った値は約0.133であり、仮想单層反射膜の場合の0.061より大きい。そこで、この9層反射膜60は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0116】

実施の形態34。

本発明の実施の形態34に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図44を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態33と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 $\lambda = 1020\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を2.0%としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.2, A = 2.7, B = 2.0, C = 2.0, D = 2.0$ としている。さらに、アルミナ及び酸化タンタルのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.35769, \phi_2 = 0.958077$ とすることによって波長1020nmで反射率2.0%とすることができます。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 19.20\text{ nm} / 76.22\text{ nm} / 259.22\text{ nm} / 56.46\text{ nm} / 192.02\text{ nm} / 56.46\text{ nm} / 192.02\text{ nm} / 56.46\text{ nm} / 192.02\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は1100.08nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1889.46nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約7.71倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0117】

図44は、この9層反射膜60の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、目標反射率の約3%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長912nmから1048nmにわたって反射率は1.6%から4.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長1020nmの設定反射率2.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、1.0%~4.0%の範囲の連続した波長帯域幅は136nmである。この波長帯域幅を設定波長1020nmで割った値は約0.133であり、仮想单層反射膜の場合の0.061より大きい。そこで、この9層反射膜60は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0118】

実施の形態35。

本発明の実施の形態35に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図45を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態33に係る半導体光素子と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 $\lambda = 980\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を3.0%としている点で相違する。また、各パラメータを、 $O = 0.2, A = 2.7, B = 2.0, C = 2.0, D = 2.0$ とした場合、酸化タンタル及びアルミナの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 が、それぞれ $\phi_1 = 0.377348, \phi_2 = 0.935416$ である場合に波長980nmで反射率3%が得られる。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 18.01\text{ nm} / 77.25\text{ nm} / 243.16\text{ nm} / 57.22\text{ nm} / 180.12\text{ nm} / 57.22\text{ nm} / 180.12\text{ nm} / 57.22\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は1050.44nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1889.46nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約7.71倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

$n_i \cdot d_i$ の総和 $\sum n_i \cdot d_i$ は、1810.49 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 7.49 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0119】

図45は、この9層反射膜60の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、目標反射率の4%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 882 nm から 1007 nm にわたって反射率は極小値の 2.6% から 5.0% の範囲内に収まっている。また、所定波長 980 nm の反射率 3.0% を基準として、-1.0% から +2.0% の範囲、即ち、2.0% ~ 5.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 125 nm である。この波長帯域幅を所定波長 980 nm で割った値は約 0.128 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この9層反射膜60は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0120】

実施の形態36.

本発明の実施の形態36に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図46を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態35に係る半導体光素子と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 $\lambda = 1017$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 3.0% としている点で相違する。また、各パラメータを、O = 0.2, A = 2.7, B = 2.0, C = 2.0, D = 2.0 とした場合、酸化タンタル及びアルミナの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 が、それぞれ $\phi_1 = 0.377348$, $\phi_2 = 0.935416$ である場合に波長 1017 nm で反射率 3% が得られる。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 18.69$ nm / 80.17 nm / 252.35 nm / 59.39 nm / 186.92 nm / 59.39 nm / 186.92 nm / 59.39 nm である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 1090.14 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i \cdot d_i$ の総和 $\sum n_i \cdot d_i$ は、1878.92 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 7.67 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0121】

図46は、この9層反射膜60の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、目標反射率の4%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 915 nm から 1045 nm にわたって反射率は極小値の 2.6% から 5.0% の範囲内に収まっている。また、所定波長 1017 nm の反射率 3.0% を基準として、-1.0% から +2.0% の範囲、即ち、2.0% ~ 5.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 130 nm である。この波長帯域幅を所定波長 1017 nm で割った値は約 0.128 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この9層反射膜60は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0122】

実施の形態37.

本発明の実施の形態37に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図47を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態33に係る半導体光素子と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 $\lambda = 980$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 4.0% としている点で相違する。また、各パラメータを、O = 0.15, A = 2.8, B = 2.0, C = 2.0, D = 2.0 とした場合、酸化タンタル及びアルミナの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 が、それぞれ $\phi_1 = 0.38725$, $\phi_2 = 0.911369$ である場合に波長 980 nm で反射率 4% が得られる。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 13.16$ nm / 82.22 nm / 245.69 nm / 58.73 nm / 175.49 nm / 58.73 nm

／175.49 nm／58.73 nm／175.49 nmである。全体の膜厚 ($d_{t,a_1} = \sum d_i$) は 1043.73 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1803.77 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 7.36 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0123】

図47は、この9層反射膜60の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、目標反射率の5%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 883 nm から 1006 nm にわたって反射率は極小値の 3.6% から 6.0% の範囲内に収まっている。また、所定波長 980 nm の反射率 4.0% を基準として、-1.0% から +2.0% の範囲、即ち、3.0%～6.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 123 nm である。この波長帯域幅を所定波長 980 nm で割った値は約 0.126 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この9層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0124】

実施の形態38.

本発明の実施の形態38に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図48を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態37に係る半導体光素子と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 $\lambda = 1017$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 4.0% としている点で相違する。また、各パラメータを、 $O = 0.15$ 、 $A = 2.8$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ 、 $D = 2.0$ とした場合、酸化タンタル及びアルミナの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 が、それぞれ $\phi_1 = 0.38725$ 、 $\phi_2 = 0.911369$ である場合に波長 1017 nm で反射率 4% が得られる。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 13.66$ nm / 85.32 nm / 245.96 nm / 60.94 nm / 182.12 nm / 60.94 nm / 182.12 nm / 60.94 nm である。全体の膜厚 ($d_{t,a_1} = \sum d_i$) は 1083.12 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1871.83 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 7.64 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0125】

図48は、この9層反射膜60の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、目標反射率の5%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 916 nm から 1044 nm にわたって反射率は極小値の 3.6% から 6.0% の範囲内に収まっている。また、所定波長 1017 nm の反射率 4.0% を基準として、-1.0% から +2.0% の範囲、即ち、3.0%～6.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 128 nm である。この波長帯域幅を所定波長 1017 nm で割った値は約 0.126 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この9層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0126】

実施の形態39.

本発明の実施の形態39に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図49を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態33に係る半導体光素子と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 $\lambda = 980$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 5.0% としている点で相違する。また、各パラメータを、 $O = 0.10$ 、 $A = 2.9$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ 、 $D = 2.0$ とした場合、酸化タンタル及びアルミナの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 が、それぞれ $\phi_1 = 0.397519$ 、 $\phi_2 = 0.886992$ である場合に波長 980 nm で反射率 5% が得られる。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 13.66$ nm / 85.32 nm / 245.96 nm / 60.94 nm / 182.12 nm / 60.94 nm / 182.12 nm / 60.94 nm である。全体の膜厚 ($d_{t,a_1} = \sum d_i$) は 1083.12 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1871.83 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 7.64 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

$A_{d1}/A_{d2}/B_{d1}/B_{d2}/C_{d1}/C_{d2}/D_{d1}/D_{d2} = 8.54 \text{ nm}/87.41 \text{ nm}/247.66 \text{ nm}/60.28 \text{ nm}/170.80 \text{ nm}/60.28 \text{ nm}/170.80 \text{ nm}/60.28 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{tot} = \sum d_i$) は 1036.85 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1801.04 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245 \text{ nm}$) の約 7.35 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【012.7】

図49は、この9層反射膜60の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、目標反射率の約6%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 890 nm から 1006 nm にわたって反射率は極小値の4.6%から7.0%の範囲内に収まっている。また、所定波長 980 nm の反射率5.0%を基準として、 -1.0% から $+2.0\%$ の範囲、即ち、 $4.0\% \sim 7.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 116 nm である。この波長帯域幅を所定波長 980 nm で割った値は約 0.118 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この9層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【012.8】

実施の形態40.

本発明の実施の形態40に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図50を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態39に係る半導体光素子と比較すると、その構成において共通するが、設定波長 $\lambda = 1013 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 5.0% としている点で相違する。また、各パラメータを、 $O = 0.10$ 、 $A = 2.9$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ 、 $D = 2.0$ とした場合、酸化タンタル及びアルミナの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 が、それぞれ $\phi_1 = 0.397519$ 、 $\phi_2 = 0.886992$ である場合に波長 1013 nm で反射率5%が得られる。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $O_{d2}/A_{d1}/A_{d2}/B_{d1}/B_{d2}/C_{d1}/C_{d2}/D_{d1}/D_{d2} = 8.83 \text{ nm}/90.35 \text{ nm}/256.00 \text{ nm}/62.31 \text{ nm}/176.55 \text{ nm}/62.31 \text{ nm}/176.55 \text{ nm}/62.31 \text{ nm}/176.55 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{tot} = \sum d_i$) は 1071.76 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1857.42 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245 \text{ nm}$) の約 7.58 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【012.9】

図50は、この9層反射膜60の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、目標反射率の6%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 920 nm から 1040 nm にわたって反射率は極小値の4.6%から7.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長 1013 nm の反射率5.0%を基準として、 -1.0% から $+2.0\%$ の範囲、即ち、 $4.0\% \sim 7.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅 $\Delta\lambda$ は 120 nm である。この波長帯域幅を設定波長 $\lambda = 1013 \text{ nm}$ で割った値は約 0.118 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.061 より大きい。そこで、この9層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【013.0】

以下に、実施の形態33から実施の形態40に係る半導体光素子の多層反射膜の特性について、表4に示した。表4には、多層反射膜の特性として、多層反射膜の構成、設定波長 λ 及び設定反射率 $R(\lambda)$ 、極小反射率、 $\sum n_i d_i$ 及び所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (245 nm) との対比、 $R(\lambda)$ の $-1.0\sim+2.0\%$ の範囲となる波長帯域幅 $\Delta\lambda$ 、 $\Delta\lambda/\lambda$ について示した。

【013.1】

【表4】

表4

多層反射膜の特性						
実施の形態	多層反射膜の構成	設定波長 λ 設定反射率 R (λ)	極小反射率	$\sum n_i d_i$ 、 波長980nmの 1/4 波長 (245nm)との 対比	R (λ) の -1.0~2.0% となる波長 帯域 $\Delta \lambda$	$\Delta \lambda / \lambda$
33	9層膜	980nm 2 %	1.4%	1815.34nm 7.41倍	130nm	130/980= 0.133
34	9層膜	1020nm 2 %	1.4%	1889.46nm 7.71倍	136nm	136/1020= 0.133
35	9層膜	980nm 3 %	2.6%	1810.49nm 7.49倍	125nm	125/980= 0.128
36	9層膜	1017nm 3 %	2.6%	1878.92nm 7.67倍	130nm	130/1017= 0.128
37	9層膜	980nm 4 %	3.6%	1803.77nm 7.36倍	123nm	123/980= 0.126
38	9層膜	1017nm 4 %	3.6%	1871.83nm 7.64倍	128nm	128/1017= 0.126
39	9層膜	980nm 5 %	4.6%	1801.04nm 7.35倍	116nm	116/980= 0.118
40	9層膜	1013nm 5 %	4.6%	1857.42nm 7.58倍	120nm	120/1013= 0.118

【0132】

実施の形態41.

本発明の実施の形態3に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図51を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980\text{ nm}$ で設定反射率R (λ) を6. 0 %としている点で相違する。また、パラメータはO = 0. 15, A = 1. 95, B = 2. 0, C = 2. 0としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0. 845348$ 、 $\phi_2 = 0. 578286$ とすることによって波長980 nmで反射率6. 0 %とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 8. 35\text{ nm} / 124. 99\text{ nm} / 108. 57\text{ nm} / 128. 20\text{ nm} / 111. 35\text{ nm} / 128. 20\text{ nm} / 111. 35\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は721. 01 nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1334. 70 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長(=245 nm)の約5. 45倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0133】

図51は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の7 %前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長828 nmから1009 nmにわたって反射率は5. 4 %から8. 0 %の範囲内に収まっている。また、設定波長980 nmの反射率6. 0 %を基準として、-1. 0 %から+2. 0 %の範囲、即ち、5. 0 %~8. 0 %の範囲の連続した波長帯域幅は181 nmである。この波長帯域幅を設定波長980 nmで割った値は約0. 185であり、仮想单層反射膜の場合の0. 062より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0134】

実施の形態42.

本発明の実施の形態42に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図52を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態41に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1045\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を6.0%としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.15$ 、 $A = 1.95$ 、 $B = 2.0$ 、 $C = 2.0$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.541022$ 、 $\phi_2 = 0.741397$ とすることによって波長 1045 nm で反射率6.0%とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 8.91\text{ nm} / 133.28\text{ nm} / 115.77\text{ nm} / 136.70\text{ nm} / 118.74\text{ nm} / 136.70\text{ nm} / 118.74\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{tot} = \sum d_i$)は 768.84 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1423.24 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長($= 245\text{ nm}$)の約5.81倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0135】

図52は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、目標反射率の7%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 883 nm から 1076 nm にわたって反射率は5.4%から8.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長 1045 nm の設定反射率6.0%を基準として、-1.0%から+2.0%の範囲、即ち、反射率5.0%～8.0%の範囲の連続した波長帯域幅は 193 nm である。この波長帯域幅を設定波長 1045 nm で割った値は約0.185であり、仮想単層反射膜の場合の0.062より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0136】

以下に、実施の形態41と実施の形態42とに係る半導体光素子の多層反射膜の特性について、表5に示した。表5には、多層反射膜の特性として、多層反射膜の構成、設定波長 λ 及び設定反射率 $R(\lambda)$ 、極小反射率、 $\sum n_i d_i$ 及び所定波長 980 nm の $1/4$ 波長(245 nm)との対比、 $R(\lambda)$ の-1.0～+2.0%の範囲となる波長帯域幅 $\Delta\lambda$ 、 $\Delta\lambda/\lambda$ について示した。

【0137】

【表5】

表5

多層反射膜の特性						
実施の形態	多層反射膜の構成	設定波長 λ 設定反射率 $R(\lambda)$	極小反射率	$\sum n_i d_i$ 、 波長 980 nm の $1/4$ 波長 (245 nm)との 対比	$R(\lambda)$ の -1.0～2.0% となる波長 帯域 $\Delta\lambda$	$\Delta\lambda/\lambda$
41	7層膜	980 nm 6%	5.4%	1334.70 nm 5.45倍	181 nm	$181/980 = 0.185$
42	7層膜	1045 nm 6%	5.4%	1423.24 nm 5.81倍	193 nm	$193/1045 = 0.185$

【0138】

実施の形態43.

本発明の実施の形態43に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図53を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、設

定波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 6.0% としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.20$ 、 $A = 1.97$ 、 $B = 2.35$ 、 $C = 2.10$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.79703$ 、 $\phi_2 = 0.528684$ とすることによって波長 980 nm で反射率 6.0% とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 10.18 \text{ nm} / 119.06 \text{ nm} / 100.28 \text{ nm} / 145.02 \text{ nm} / 119.62 \text{ nm} / 126.91 \text{ nm} / 106.89 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 727.96 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1350.16 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245 \text{ nm}$) の約 5.51 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0139】

図 53 は、この 7 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、目標反射率の 7% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 813 nm から 994 nm にわたって反射率は 5.0% から 7.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 6.0% を基準として、 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲、即ち、反射率 $4.5\% \sim 7.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 181 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.185 である。

【0140】

ここで、比較のために導波光の所定波長 980 nm について $5/4$ 波長の厚さの仮想单層反射膜を仮定する。設定条件は、波長 980 nm で極小反射率 4% をとするように、 $n_c = 3.37$ 、 $n_1 = 1.449$ である。この場合、極小反射率を基準として $+2.5\%$ 、すなわち反射率 $4\% \sim 6.5\%$ の波長範囲は $949 \text{ nm} \sim 1013 \text{ nm}$ であり、その波長帯域幅は 64 nm である。この波長帯域幅の広さの目安として、導波光の所定波長 980 nm で割ると 0.065 が得られる。

【0141】

そこで、この実施の形態 43 に係る 7 層反射膜について、上記仮想单層反射膜と比較すると、導波光の波長での反射率 $+2.5\%$ となる波長帯域幅をその波長で割った商は、 0.185 であり、仮想单層反射膜の 0.065 よりはるかに大きい。そこで、この 7 層反射膜は、広い波長帯域にわたって平坦部を有していることがわかる。

【0142】

実施の形態 44。

本発明の実施の形態 44 に係る 7 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 54 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 43 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1063 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 6.0% としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.20$ 、 $A = 1.97$ 、 $B = 2.35$ 、 $C = 2.10$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.79703$ 、 $\phi_2 = 0.528684$ とすることによって波長 1063 nm で反射率 6.0% とすることができます。この場合、7 層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 11.04 \text{ nm} / 129.14 \text{ nm} / 108.77 \text{ nm} / 154.05 \text{ nm} / 129.75 \text{ nm} / 137.66 \text{ nm} / 115.95 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 786.36 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1457.82 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245 \text{ nm}$) の約 5.95 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0143】

図 54 は、この 7 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 7 層反射膜は、目標反射率の 7% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 882 nm から 1078 nm にわた

って反射率は5. 0 %から7. 0 %の範囲内に収まっている。また、設定波長1063 nmの設定反射率6. 0 %を基準として、-1. 5 %から+1. 0 %の範囲、即ち、反射率4. 5 %～7. 0 %の範囲の連続した波長帯域幅は196 nmである。この波長帯域幅を設定波長1063 nmで割った値は約0. 184であり、仮想単層反射膜の場合の0. 065より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって平坦部を有していることがわかる。

【0144】

実施の形態45.

本発明の実施の形態45に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図55を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980$ nmで設定反射率R(λ)を7. 0 %としている点で相違する。また、パラメータはO=0. 17、A=1. 97、B=2. 35、C=2. 05としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0. 80763$ 、 $\phi_2 = 0. 525803$ とすることによって波長980 nmで反射率7. 0 %とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 8. 61\text{ nm} / 120. 64\text{ nm} / 99. 73\text{ nm} / 143. 91\text{ nm} / 118. 97\text{ nm} / 125. 54\text{ nm} / 103. 78\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は721. 18 nmである。それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和 $\sum n_i d_i$ は、1338. 78 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長(=245 nm)の約5. 46倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0145】

図55は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の7%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長797 nmから993 nmにわたって反射率は5. 9 %から8. 0 %の範囲内に収まっている。また、設定波長980 nmの反射率6. 0 %を基準として、-1. 5 %から+1. 0 %の範囲、即ち、反射率5. 5 %～8. 0 %の範囲の連続した波長帯域幅は196 nmである。この波長帯域幅を設定波長980 nmで割った値は約0. 200であり、仮想単層反射膜の場合の0. 065より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0146】

実施の形態46.

本発明の実施の形態46に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図56を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態45に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1073$ nmで設定反射率R(λ)を7. 0 %としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0. 80763$ 、 $\phi_2 = 0. 525803$ とすることによって波長1073 nmで反射率7. 0 %とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 9. 42\text{ nm} / 132. 09\text{ nm} / 109. 19\text{ nm} / 157. 57\text{ nm} / 130. 26\text{ nm} / 137. 45\text{ nm} / 113. 63\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は789. 61 nmである。それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和 $\sum n_i d_i$ は、1465. 82 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長(=245 nm)の約5. 98倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0147】

図56は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の7%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長872 nmから1088 nmにわたって反射率は5. 9 %から8. 0 %の範囲内に収まっている。また、設定波長1073 nm

mの設定反射率7.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率5.5%～8.0%の範囲の連続した波長帯域幅は196nmである。この波長帯域幅を設定波長1073nmで割った値は約0.183であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0148】

実施の形態47.

本発明の実施の形態47に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図57を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を8.0%としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.17$ 、 $A = 1.97$ 、 $B = 2.35$ 、 $C = 2.0$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.806965$ 、 $\phi_2 = 0.531203$ とすることによって波長980nmで反射率8.0%とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 8.69\text{ nm} / 120.54\text{ nm} / 100.75\text{ nm} / 143.79\text{ nm} / 120.19\text{ nm} / 122.38\text{ nm} / 102.29\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は718.63nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1333.17nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約5.44倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0149】

図57は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の8%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長786nmから994nmにわたって反射率は7.0%から9.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980nmの反射率8.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率6.5%～9.0%の範囲の連続した波長帯域幅は208nmである。この波長帯域幅を設定波長980nmで割った値は約0.212であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0150】

実施の形態48.

本発明の実施の形態48に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図58を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態47に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1079\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を8.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.806965$ 、 $\phi_2 = 0.531203$ とすることによって波長1079nmで反射率8.0%とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 9.57\text{ nm} / 132.72\text{ nm} / 110.93\text{ nm} / 158.32\text{ nm} / 132.33\text{ nm} / 134.74\text{ nm} / 112.62\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は791.23nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1467.86nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約5.99倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0151】

図58は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の8%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長866nmから1094nmにわたって反射率は7.0%から9.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長1079nmの設定反射率8.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率

6. 5 %～9. 0 %の範囲の連続した波長帯域幅は228 nmである。この波長帯域幅を設定波長1079 nmで割った値は約0. 211であり、仮想单層反射膜の場合の0. 065より大きい。そこで、この7層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたって平坦部を有していることがわかる。

【0152】

実施の形態49.

本発明の実施の形態49に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図59を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980$ nmで設定反射率R(λ)を9. 0 %としている点で相違する。また、パラメータはO=0. 20、A=2. 05、B=2. 40、C=1. 95としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.734549$ 、 $\phi_2 = 0.580342$ とすることによって波長980 nmで反射率9. 0 %とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚はO d₂ / A d₁ / A d₂ / B d₁ / B d₂ / C d₁ / C d₂ = 11. 17 nm / 114. 18 nm / 114. 54 nm / 133. 67 nm / 134. 10 nm / 108. 61 nm / 108. 96 nmである。全体の膜厚(d_{total} = $\sum d_i$)は725. 23 nmである。それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和 $\sum n_i d_i$ は、1330. 65 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長(=245 nm)の約5. 43倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0153】

図59は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の9 %前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長793 nmから994 nmにわたって反射率は8. 1 %から10. 0 %の範囲内に収まっている。また、設定波長980 nmの反射率8. 0 %を基準として、-1. 5 %から+1. 0 %の範囲、即ち、反射率7. 5 %～10. 0 %の範囲の連続した波長帯域幅は202 nmである。この波長帯域幅を設定波長980 nmで割った値は約0. 206であり、仮想单層反射膜の場合の0. 065より大きい。そこで、この7層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0154】

実施の形態50.

本発明の実施の形態50に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図60を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態49に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1075$ nmで設定反射率R(λ)を9. 0 %としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.734549$ 、 $\phi_2 = 0.580342$ とすることによって波長1075 nmで反射率9. 0 %とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚はO d₂ / A d₁ / A d₂ / B d₁ / B d₂ / C d₁ / C d₂ = 12. 26 nm / 125. 25 nm / 125. 65 nm / 146. 63 nm / 147. 10 nm / 119. 14 nm / 119. 52 nmである。全体の膜厚(d_{total} = $\sum d_i$)は795. 55 nmである。それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和 $\sum n_i d_i$ は、1459. 67 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長(=245 nm)の約5. 96倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0155】

図60は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の9 %前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長870 nmから1090 nmにわたって反射率は8. 1 %から10. 0 %の範囲内に収まっている。また、設定波長1075 nmの設定反射率9. 0 %を基準として、-1. 5 %から+1. 0 %の範囲、即ち、反射率7. 5 %～10. 0 %の範囲の連続した波長帯域幅は220 nmである。この波長帯域

幅を設定波長1075nmで割った値は約0.205であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたって平坦部を有していることがわかる。

【0156】

実施の形態51.

本発明の実施の形態51に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図61を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を10.0%としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.17$ 、 $A = 2.10$ 、 $B = 2.45$ 、 $C = 1.95$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.729549$ 、 $\phi_2 = 0.564265$ とすることによって波長980nmで反射率10.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 9.24\text{ nm} / 116.17\text{ nm} / 114.09\text{ nm} / 135.53\text{ nm} / 133.10\text{ nm} / 107.87\text{ nm} / 105.94\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は721.94nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1326.67nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約5.41倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0157】

図61は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の10%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長773nmから994nmにわたって反射率は9.0%から11.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980nmの反射率10.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率8.5%～11.0%の範囲の連続した波長帯域幅は221nmである。この波長帯域幅を設定波長980nmで割った値は約0.226であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0158】

実施の形態52.

本発明の実施の形態52に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図62を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態51に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1087\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を10.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.729549$ 、 $\phi_2 = 0.564265$ とすることによって波長1087nmで反射率10.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 10.24\text{ nm} / 128.85\text{ nm} / 126.54\text{ nm} / 150.33\text{ nm} / 147.63\text{ nm} / 119.65\text{ nm} / 117.50\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は800.74nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1471.49nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約6.01倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0159】

図62は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の10%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長857nmから1102nmにわたって反射率は9.0%から11.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長1087nmの設定反射率10.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率8.5%～11.0%の範囲の連続した波長帯域幅は245nmである。この波長帯域幅を設定波長1087nmで割った値は約0.225であり、仮想単層反射膜の場合

の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0160】

実施の形態53.

本発明の実施の形態53に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図63を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を11.0%としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.20$ 、 $A = 2.20$ 、 $B = 2.55$ 、 $C = 1.95$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.674425$ 、 $\phi_2 = 0.572301$ とすることによって波長 980 nm で反射率11.0%とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 11.02\text{ nm} / 112.50\text{ nm} / 121.22\text{ nm} / 130.40\text{ nm} / 140.51\text{ nm} / 99.72\text{ nm} / 107.45\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は 722.82 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1320.69 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長($= 245\text{ nm}$)の約5.39倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0161】

図63は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の11%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 764 nm から 994 nm にわたって反射率は10.2%から12.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率11.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率9.5%～12.0%の範囲の連続した波長帯域幅は 230 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約0.235であり、仮想单層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0162】

実施の形態54.

本発明の実施の形態54に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図64を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態53に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1092\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を11.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.674425$ 、 $\phi_2 = 0.572301$ とすることによって波長 1092 nm で反射率11.0%とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 12.28\text{ nm} / 125.36\text{ nm} / 135.08\text{ nm} / 145.31\text{ nm} / 156.56\text{ nm} / 111.12\text{ nm} / 119.73\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は 805.44 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1471.66 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長($= 245\text{ nm}$)の約6.01倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0163】

図64は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の11%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 851 nm から 1108 nm にわたって反射率は10.2%から12.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長 1092 nm の設定反射率11.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率9.5%～12.0%の範囲の連続した波長帯域幅は 257 nm である。この波長帯域幅を設定波長 1092 nm で割った値は約0.235であり、仮想单層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる

平坦部を有していることがわかる。

【0164】

実施の形態55.

本発明の実施の形態55に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図65を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を12.0%としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.20$ 、 $A = 2.35$ 、 $B = 2.65$ 、 $C = 1.95$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.614143$ 、 $\phi_2 = 0.581984$ とすることによって波長 980 nm で反射率12.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 11.21\text{ nm} / 109.43\text{ nm} / 131.68\text{ nm} / 123.40\text{ nm} / 148.49\text{ nm} / 90.81\text{ nm} / 109.26\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は 724.28 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1314.76 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長($= 245\text{ nm}$)の約5.37倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0165】

図65は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の12%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 751 nm から 995 nm にわたって反射率は 10.9% から 13.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率12.0%を基準として、 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲、即ち、反射率 $10.5\% \sim 13.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 244 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.249 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この7層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0166】

実施の形態56.

本発明の実施の形態56に係る7層反射膜を備えた半導体光素子について、図66を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態47に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1100\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を12.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.614143$ 、 $\phi_2 = 0.581984$ とすることによって波長 1100 nm で反射率12.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 12.58\text{ nm} / 122.83\text{ nm} / 147.80\text{ nm} / 138.51\text{ nm} / 166.67\text{ nm} / 101.93\text{ nm} / 122.64\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は 812.96 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1475.74 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長($= 245\text{ nm}$)の約6.02倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0167】

図66は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の12%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 842 nm から 1117 nm にわたって反射率は 10.9% から 13.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 1100 nm の設定反射率12.0%を基準として、 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲、即ち、反射率 $10.5\% \sim 13.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 275 nm である。この波長帯域幅を設定波長 1100 nm で割った値は約 0.250 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0168】

以下に、実施の形態43から実施の形態56に係る半導体光素子の多層反射膜の特性について、表6に示した。表6には、多層反射膜の特性として、多層反射膜の構成、設定波長 λ 及び設定反射率 $R(\lambda)$ 、極小反射率、 $\sum n_i d_i$ 及び所定波長980nmの1/4波長(245nm)との対比、 $R(\lambda)$ の-1.5~+1.0%の範囲となる波長帯域幅 $\Delta\lambda$ 、 $\Delta\lambda/\lambda$ について示した。

【0169】

【表6】

表6

実施の形態	多層反射膜の特性						
	多層反射膜の構成	設定波長 λ	設定反射率 $R(\lambda)$	極小反射率	$\sum n_i d_i$ 、波長980nmの1/4波長(245nm)との対比	$R(\lambda)$ の-1.5~+1.0%となる波長帯域 $\Delta\lambda$	$\Delta\lambda/\lambda$
43	7層膜	980nm 6%	5.0%	1350.16nm 5.51倍	181nm	181/980=0.185	
44	7層膜	1063nm 6%	5.0%	1457.82nm 5.95倍	196nm	196/1063=0.184	
45	7層膜	980nm 7%	5.9%	1338.78nm 5.46倍	196nm	196/980=0.200	
46	7層膜	1073nm 7%	5.9%	1465.82nm 5.98倍	196nm	196/1073=0.183	
47	7層膜	980nm 8%	7.0%	1333.17nm 5.44倍	208nm	208/980=0.212	
48	7層膜	1079nm 8%	7.0%	1467.86nm 5.99倍	228nm	228/1079=0.211	
49	7層膜	980nm 9%	8.1%	1330.65nm 5.43倍	202nm	202/980=0.206	
50	7層膜	1075nm 9%	8.1%	1459.67nm 5.96倍	220nm	220/1075=0.205	
51	7層膜	980nm 10%	9.0%	1326.67nm 5.41倍	221nm	221/980=0.226	
52	7層膜	1087nm 10%	9.0%	1471.49nm 6.01倍	245nm	245/1087=0.225	
53	7層膜	980nm 11%	10.2%	1320.69nm 5.39倍	230nm	230/980=0.235	
54	7層膜	1092nm 11%	10.2%	1471.66nm 6.01倍	257nm	257/1092=0.235	
55	7層膜	980nm 12%	10.9%	1314.76nm 5.37倍	244nm	244/980=0.249	
56	7層膜	1100nm 12%	10.9%	1475.74nm 6.02倍	275nm	275/1100=0.250	

【0170】

実施の形態57。

本発明の実施の形態57に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図67を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態17に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda=980\text{nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を6.0%としており、パラメータは $A=1.50$ 、 $B=1.92$ 、 $C=2.2$ としている点で相違する。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1=1.16473$ 、 $\phi_2=0.7$

15823とすることによって波長980nmで反射率6.0%とすることができます。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 132.47 \text{ nm} / 103.38 \text{ nm} / 169.57 \text{ nm} / 132.32 \text{ nm} / 194.30 \text{ nm} / 151.62 \text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は883.66nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1648.43nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約6.73倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0171】

図67は、この6層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、設定反射率の6%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長966nmから1219nmにわたって反射率は5.0%から7.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980nmの反射率6.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率4.5%～7.0%の範囲の連続した波長帯域幅は253nmである。この波長帯域幅を設定波長980nmで割った値は約0.258であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この6層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0172】

実施の形態58.

本発明の実施の形態58に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図68を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態57に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 879 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を6.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1.16473$ 、 $\phi_2 = 0.715823$ とすることによって波長879nmで反射率6.0%とすることができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 118.82 \text{ nm} / 92.72 \text{ nm} / 152.09 \text{ nm} / 118.69 \text{ nm} / 174.27 \text{ nm} / 136.00 \text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は792.59nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1478.54nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約6.03倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0173】

図68は、この6層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、設定反射率の6%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長866nmから1093nmにわたって反射率は5.0%から7.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長879nmの設定反射率6.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率4.5%～7.0%の範囲の連続した波長帯域幅は227nmである。この波長帯域幅を設定波長879nmで割った値は約0.258であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この6層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0174】

実施の形態59.

本発明の実施の形態59に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図69を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態17に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を7.0%としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.50$ 、 $B = 1.95$ 、 $C = 2.20$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1.13181$ 、 $\phi_2 = 0.744018$ とすることによって波長980nmで反射率7.0%とすることができる。

きる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 128.73 \text{ nm} / 107.45 \text{ nm} / 167.35 \text{ nm} / 139.69 \text{ nm} / 188.80 \text{ nm} / 157.59 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 889.61 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1653.06 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (= 245 nm) の約 6.75 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0175】

図69は、この6層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、設定反射率の7%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 964 nm から 1219 nm にわたって反射率は 6.4% から 8.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 7.0% を基準として、 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲、即ち、反射率 $5.5\% \sim 8.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 255 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.260 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この6層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0176】

実施の形態60.

本発明の実施の形態60に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図70を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態59に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 880 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 7.0% としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1.13181$ 、 $\phi_2 = 0.744018$ とすることによって波長 880 nm で反射率 7.0% とすることができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 115.59 \text{ nm} / 96.49 \text{ nm} / 150.27 \text{ nm} / 125.43 \text{ nm} / 169.54 \text{ nm} / 141.51 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 798.83 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1484.37 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (= 245 nm) の約 6.06 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0177】

図70は、この6層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、設定反射率の7%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 866 nm から 1094 nm にわたって反射率は 6.4% から 8.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 880 nm の設定反射率 7.0% を基準として、 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲、即ち、反射率 $5.5\% \sim 8.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 228 nm である。この波長帯域幅を設定波長 880 nm で割った値は約 0.259 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この6層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0178】

実施の形態61.

本発明の実施の形態61に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図71を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態17に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 8.0% としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.52$ 、 $B = 1.95$ 、 $C = 2.20$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1.09941$ 、 $\phi_2 = 0.769346$ とすることによって波長 980 nm で反射率 8.0% とすることができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d$

$A_1/C d_2 = 126.71 \text{ nm}/112.59 \text{ nm}/16.2.56 \text{ nm}/144.44 \text{ nm}/183.40 \text{ nm}/162.96 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 892.66 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1652.67 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245 \text{ nm}$) の約 6.75 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0179】

図71は、この6層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、設定反射率の8%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 964 nm から 1223 nm にわたって反射率は 7.4% から 9.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 8.0% を基準として、 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲、即ち、反射率 $6.5\% \sim 9.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 259 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.264 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この6層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0180】

実施の形態62.

本発明の実施の形態62に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図72を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態61に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 878 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 8.0% としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1.09941$ 、 $\phi_2 = 0.769346$ とすることによって波長 878 nm で反射率 8.0% とすることができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 113.52 \text{ nm} / 100.87 \text{ nm} / 145.64 \text{ nm} / 129.41 \text{ nm} / 164.31 \text{ nm} / 146.00 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 799.75 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1480.65 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($= 245 \text{ nm}$) の約 6.04 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0181】

図72は、この6層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、設定反射率の8%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 864 nm から 1096 nm にわたって反射率は 7.4% から 9.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 878 nm の設定反射率 8.0% を基準として、 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲、即ち、反射率 $6.5\% \sim 9.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 232 nm である。この波長帯域幅を設定波長 878 nm で割った値は約 0.264 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この6層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0182】

実施の形態63.

本発明の実施の形態63に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図73を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態17に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 9.0% としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.55$ 、 $B = 1.97$ 、 $C = 2.25$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1.0677$ 、 $\phi_2 = 0.772496$ とすることによって波長 980 nm で反射率 8.0% とすることができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 125.49 \text{ nm} / 115.28 \text{ nm} / 159.49 \text{ nm} / 146.52 \text{ nm}$

／182.16 nm／167.34 nmである。全体の膜厚 ($d_{tot} = \sum d_i$) は 896.28 nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1656.11 nmであり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (= 245 nm) の約 6.76 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0183】

図73は、この6層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、設定反射率の9%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 963 nm から 1235 nm にわたって反射率は 8.4% から 10.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 9.0% を基準として、-1.5% から +1.0% の範囲、即ち、反射率 7.5% ~ 10.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 272 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.278 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この6層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0184】

実施の形態 6 4.

本発明の実施の形態 6 4 に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図74を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 7 3 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 874$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 9.0% としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1.0677$ 、 $\phi_2 = 0.772496$ とすることによって波長 874 nm で反射率 9.0% とすることができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 111.91$ nm / 102.81 nm / 142.24 nm / 130.67 nm / 162.45 nm / 149.24 nm である。全体の膜厚 ($d_{tot} = \sum d_i$) は 799.32 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1476.95 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (= 245 nm) の約 6.03 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0185】

図74は、この6層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、設定反射率の9%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 859 nm から 1101 nm にわたって反射率は 8.4% から 10.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 874 nm の設定反射率 9.0% を基準として、-1.5% から +1.0% の範囲、即ち、反射率 7.5% ~ 10.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 242 nm である。この波長帯域幅を設定波長 874 nm で割った値は約 0.244 であり、仮想単層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この6層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0186】

実施の形態 6 5.

本発明の実施の形態 6 5 に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図75を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 1 7 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 10.0% としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.60$ 、 $B = 2.02$ 、 $C = 2.25$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1.00317$ 、 $\phi_2 = 0.803388$ とすることによって波長 980 nm で反射率 10.0% とすることができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 121.70$ nm / 123.76 nm / 153.64 nm / 156.25 nm / 171.14 nm / 174.04 nm である。全体の膜厚 ($d_{tot} = \sum d_i$)

i) は 900.53 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1653.97 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (= 245 nm) の約 6.75 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0187】

図 75 は、この 6 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 6 層反射膜は、設定反射率の 10% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 963 nm から 1233 nm にわたって反射率は 9.5% から 11.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 8.0% を基準として、-1.5% から +1.0% の範囲、即ち、反射率 8.5% ~ 11.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 270 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.276 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 6 層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0188】

実施の形態 6.6.

本発明の実施の形態 6.6 に係る 6 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 76 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 6.5 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 874$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 10.0% としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1.0031$ 、 $\phi_2 = 0.803388$ とすることによって波長 874 nm で反射率 10.0% とすることができる。この場合、6 層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 108.53 \text{ nm} / 110.37 \text{ nm} / 137.02 \text{ nm} / 139.35 \text{ nm} / 152.63 \text{ nm} / 155.21 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 803.11 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1475.04 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 (= 245 nm) の約 6.02 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0189】

図 76 は、この 6 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 6 層反射膜は、設定反射率の 10% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 859 nm から 1100 nm にわたって反射率は 9.5% から 11.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 874 nm の設定反射率 10.0% を基準として、-1.5% から +1.0% の範囲、即ち、反射率 8.5% ~ 11.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 241 nm である。この波長帯域幅を設定波長 874 nm で割った値は約 0.276 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 6 層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0190】

実施の形態 6.7.

本発明の実施の形態 6.7 に係る 6 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 77 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 1.7 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 11.0% としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.65$ 、 $B = 2.05$ 、 $C = 2.20$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.931121$ 、 $\phi_2 = 0.862397$ とすることによって波長 980 nm で反射率 11.0% とすることができる。この場合、6 層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 116.49 \text{ nm} / 137.00 \text{ nm} / 144.73 \text{ nm} / 170.21 \text{ nm} / 155.33 \text{ nm} / 182.67 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 906.43 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$

の総和 $\sum n_i d_i$ は、1650.45 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長(=245 nm)の約6.74倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0191】

図77は、この6層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、設定反射率の11%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長963 nmから1233 nmにわたって反射率は10.4%から12.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980 nmの反射率11.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率9.5%~12.0%の範囲の連続した波長帯域幅は270 nmである。この波長帯域幅を設定波長980 nmで割った値は約0.276であり、仮想单層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この6層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0192】

実施の形態68.

本発明の実施の形態68に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図78を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態67に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 875$ nmで設定反射率R(λ)を11.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.931$ 121, $\phi_2 = 0.862397$ とすることによって波長875 nmで反射率11.0%とすることができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 104.01$ nm / 122.32 nm / 129.23 nm / 151.98 nm / 138.68 nm / 163.10 nmである。全体の膜厚($d_{tot} = \sum d_i$)は809.32 nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1473.63 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長(=245 nm)の約6.01倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0193】

図78は、この6層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、設定反射率の11%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長859 nmから1100 nmにわたって反射率は10.4%から12.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長875 nmの設定反射率11.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率9.5%~12.0%の範囲の連続した波長帯域幅は241 nmである。この波長帯域幅を設定波長875 nmで割った値は約0.275であり、仮想单層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この6層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0194】

実施の形態69.

本発明の実施の形態69に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図79を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態17に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980$ nmで設定反射率R(λ)を12.0%としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.70$, $B = 2.07$, $C = 2.15$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.853386$ 、 $\phi_2 = 0.935812$ とすることによって波長980 nmで反射率12.0%とすることができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 110.00$ nm / 153.17 nm / 133.95 nm / 186.51 nm / 139.12 nm / 193.71 nmである。全体の膜厚($d_{tot} = \sum d_i$)は916.46 nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1652.07 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長(=

245 nm) の約 6.74 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0195】

図79は、この6層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、設定反射率の12%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長961 nmから1240 nmにわたって反射率は11.5%から13.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980 nmの反射率12.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率10.5%～13.0%の範囲の連続した波長帯域幅は279 nmである。この波長帯域幅を設定波長980 nmで割った値は約0.285であり、仮想单層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この6層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0196】

実施の形態70。

本発明の実施の形態70に係る6層反射膜を備えた半導体光素子について、図80を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態69に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 873$ nmで設定反射率 $R(\lambda)$ を12.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.853$ 386、 $\phi_2 = 0.935812$ とすることによって波長873 nmで反射率12.0%とすることができる。この場合、6層反射膜のそれぞれの膜厚は $A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 = 97.99$ nm / 136.45 nm / 119.32 nm / 166.14 nm / 123.93 nm / 172.56 nmである。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は816.56 nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1471.67 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長(=245 nm)の約6.01倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0197】

図80は、この6層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この6層反射膜は、設定反射率の12%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長856 nmから1103 nmにわたって反射率は11.5%から13.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長873 nmの設定反射率12.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率10.5%～13.0%の範囲の連続した波長帯域幅は247 nmである。この波長帯域幅を設定波長873 nmで割った値は約0.283であり、仮想单層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この6層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0198】

以下に、実施の形態57から実施の形態70に係る半導体光素子の多層反射膜の特性について、表7に示した。表7には、多層反射膜の特性として、多層反射膜の構成、設定波長 λ 及び設定反射率 $R(\lambda)$ 、極小反射率、 $\sum n_i d_i$ 及び所定波長980 nmの1/4波長(245 nm)との対比、 $R(\lambda)$ の-1.5～+1.0%の範囲となる波長帯域幅 $\Delta \lambda$ 、 $\Delta \lambda / \lambda$ について示した。

【0199】

【表7】

表7

多層反射膜の特性						
実施の形態	多層反射膜の構成	設定波長 λ 設定反射率 $R(\lambda)$	極小反射率	$\sum n_i d_i$ 、 波長980nmの 1/4 波長 (245nm)との 対比	$R(\lambda)$ の -1.5~1.0% となる波長 帯域 $\Delta\lambda$	$\Delta\lambda/\lambda$
57	6層膜	980nm 6%	5.0%	1648.43nm 6.73倍	253nm	253/980=0.258
58	6層膜	879nm 6%	5.0%	1478.54nm 6.03倍	227nm	227/879=0.258
59	6層膜	980nm 7%	6.4%	1653.06nm 6.75倍	255nm	255/980=0.260
60	6層膜	880nm 7%	6.4%	1484.37nm 6.06倍	228nm	228/880=0.259
61	6層膜	980nm 8%	7.4%	1652.67nm 6.75倍	259nm	259/980=0.264
62	6層膜	878nm 8%	7.4%	1480.65nm 6.04倍	232nm	232/878=0.264
63	6層膜	980nm 9%	8.4%	1656.11nm 6.76倍	272nm	272/980=0.278
64	6層膜	874nm 9%	8.4%	1476.95nm 6.03倍	242nm	242/874=0.244
65	6層膜	980nm 10%	9.5%	1653.97nm 6.75倍	270nm	270/980=0.276
66	6層膜	874nm 10%	9.5%	1475.04nm 6.02倍	241nm	241/874=0.276
67	6層膜	980nm 11%	10.4%	1650.45nm 6.74倍	270nm	270/980=0.276
68	6層膜	875nm 11%	10.4%	1473.63nm 6.01倍	241nm	241/875=0.275
69	6層膜	980nm 12%	11.5%	1652.07nm 6.74倍	279nm	279/980=0.285
70	6層膜	873nm 12%	11.5%	1471.67nm 6.01倍	247nm	247/873=0.283

【0200】

実施の形態71.

本発明の実施の形態71に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図81を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態25に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を6.0%としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.05$ 、 $B = 2.00$ 、 $C = 2.00$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1.09082$ 、 $\phi_2 = 0.85958$ とすることによって波長980nmで反射率6.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3/A d_1/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2 = 50\text{ nm}/86.85\text{ nm}/86.90\text{ nm}/165.42\text{ nm}/165.52\text{ nm}/165.42\text{ nm}/165.52\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は885.63nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1639.85nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約6.69倍と非常に厚い。このため、端面における

る放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0201】

図81は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の6%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長965nmから1186nmにわたって反射率は5.4%から7.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980nmの反射率6.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率4.5%～7.0%の範囲の連続した波長帯域幅は221nmである。この波長帯域幅を設定波長980nmで割った値は約0.226であり、仮想单層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0202】

実施の形態72.

本発明の実施の形態72に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図82を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態71に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 889\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を6.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1.05881$ 、 $\phi_2 = 0.866436$ とすることによって波長889nmで反射率6.0%とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3/A d_1/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2 = 50\text{ nm}/76.47\text{ nm}/79.46\text{ nm}/145.66\text{ nm}/151.35\text{ nm}/145.66\text{ nm}/151.35\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{tota} = \sum d_i$)は799.95nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1479.24nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約6.04倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0203】

図82は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の6%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長877nmから1081nmにわたって反射率は5.2%から7.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長889nmの設定反射率6.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率4.5%～7.0%の範囲の連続した波長帯域幅は204nmである。この波長帯域幅を設定波長889nmで割った値は約0.229であり、仮想单層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0204】

実施の形態73.

本発明の実施の形態73に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図83を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態25に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を7.0%としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.10$ 、 $B = 2.05$ 、 $C = 2.00$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 1.01208$ 、 $\phi_2 = 0.896867$ とすることによって波長980nmで反射率7.0%とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3/A d_1/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2 = 50\text{ nm}/84.41\text{ nm}/94.98\text{ nm}/157.32\text{ nm}/177.02\text{ nm}/143.48\text{ nm}/172.70\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{tota} = \sum d_i$)は879.91nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1636.96nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約6.68倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0205】

図83は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の7%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長965nmから1194nmにわたって反射率は6.4%から8.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980nmの反射率7.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率5.5%～8.0%の範囲の連続した波長帯域幅は229nmである。この波長帯域幅を設定波長980nmで割った値は約0.234であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0206】

実施の形態74.

本発明の実施の形態74に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図84を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態73に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 886\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を7.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.97974$ 、 $\phi_2 = 0.904319$ とすることによって波長886nmで反射率7.0%とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3/A d_1/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2 = 50\text{ nm}/73.88\text{ nm}/86.59\text{ nm}/137.68\text{ nm}/161.37\text{ nm}/134.33\text{ nm}/157.43\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は801.28nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1471.83nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約6.01倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0207】

図84は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の7%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長874nmから1085nmにわたって反射率は6.0%から8.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長886nmの設定反射率7.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率5.5%～8.0%の範囲の連続した波長帯域幅は211nmである。この波長帯域幅を設定波長886nmで割った値は約0.238であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0208】

実施の形態75.

本発明の実施の形態75に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図85を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態25に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を8.0%としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.10$ 、 $B = 2.05$ 、 $C = 2.00$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.991775$ 、 $\phi_2 = 0.923736$ とすることによって波長980nmで反射率8.0%とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3/A d_1/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2 = 50\text{ nm}/82.72\text{ nm}/97.83\text{ nm}/154.16\text{ nm}/182.32\text{ nm}/150.40\text{ nm}/177.87\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は895.3nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1642.23nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約6.70倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0209】

図85は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の8%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長964nmから1204nmにわたって反射率は7.5%から9.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980nmの反射率8.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率6.5%～9.0%の範囲の連続した波長帯域幅は240nmである。この波長帯域幅を設定波長980nmで割った値は約0.245であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0210】

実施の形態76.

本発明の実施の形態76に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図86を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態75に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 881\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を8.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.958992$ 、 $\phi_2 = 0.930306$ とすることによって波長881nmで反射率8.0%とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3/A d_1/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2 = 50\text{ nm}/71.91\text{ nm}/88.57\text{ nm}/134.01\text{ nm}/165.07\text{ nm}/130.74\text{ nm}/161.04\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は801.34nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1467.89nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約5.99倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0211】

図86は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の8%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長869nmから1090nmにわたって反射率は7.1%から9.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長881nmの設定反射率8.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率6.5%～9.0%の範囲の連続した波長帯域幅は221nmである。この波長帯域幅を設定波長881nmで割った値は約0.251であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0212】

実施の形態77.

本発明の実施の形態77に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図87を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を9.0%としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.15$ 、 $B = 2.10$ 、 $C = 2.05$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.934834$ 、 $\phi_2 = 0.927699$ とすることによって波長980nmで反射率9.0%とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3/A d_1/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2 = 50\text{ nm}/81.52\text{ nm}/102.72\text{ nm}/148.86\text{ nm}/187.57\text{ nm}/145.31\text{ nm}/183.10\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は899.08nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1643.29nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約6.71倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0213】

図87は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は

波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の9%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長965nmから1220nmにわたって反射率は8.4%から10.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980nmの反射率9.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率7.5%～10.0%の範囲の連続した波長帯域幅は255nmである。この波長帯域幅を設定波長980nmで割った値は約0.260であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0214】

実施の形態78.

本発明の実施の形態78に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図88を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態77に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 874\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を9.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.900337$ 、 $\phi_2 = 0.935222$ とすることによって波長874nmで反射率9.0%とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3/A d_1/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2 = 50\text{ nm}/70.02\text{ nm}/92.35\text{ nm}/127.86\text{ nm}/168.64\text{ nm}/124.81\text{ nm}/164.62\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は798.3nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1456.86nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約5.95倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0215】

図88は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の9%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長863nmから1096nmにわたって反射率は7.9%から10.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長874nmの設定反射率9.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率7.5%～10.0%の範囲の連続した波長帯域幅は233nmである。この波長帯域幅を設定波長874nmで割った値は約0.267であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0216】

実施の形態79.

本発明の実施の形態79に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図89を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態25に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を10.0%としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.15$ 、 $B = 2.10$ 、 $C = 2.05$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.914148$ 、 $\phi_2 = 0.95535$ とすることによって波長980nmで反射率10.0%とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3/A d_1/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2 = 50\text{ nm}/79.71\text{ nm}/105.78\text{ nm}/145.56\text{ nm}/193.16\text{ nm}/142.10\text{ nm}/188.56\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は904.87nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1649.03nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約6.73倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0217】

図89は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の10%前後の平坦部

分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長963nmから1235nmにわたって反射率は9.6%から11.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980nmの反射率10.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率8.5%～11.0%の範囲の連続した波長帯域幅は272nmである。この波長帯域幅を設定波長980nmで割った値は約0.278であり、仮想单層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0218】

実施の形態80.

本発明の実施の形態80に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図90を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態79に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 868\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を10.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.879123$ 、 $\phi_2 = 0.96166$ とすることによって波長868nmで反射率10.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は d_3/A 、 $d_1/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2 = 50\text{ nm}/67.90\text{ nm}/94.31\text{ nm}/123.99\text{ nm}/172.21\text{ nm}/121.03\text{ nm}/168.11\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は797.55nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1451.38nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約5.92倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0219】

図90は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の8%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長856nmから1102nmにわたって反射率は8.7%から11.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長868nmの設定反射率10.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率8.5%～11.0%の範囲の連続した波長帯域幅は246nmである。この波長帯域幅を設定波長868nmで割った値は約0.283であり、仮想单層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0220】

実施の形態81.

本発明の実施の形態81に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図91を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態25に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を11.0%としている点で相違する。また、パラメータは $A = 1.17$ 、 $B = 2.10$ 、 $C = 2.05$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.881444$ 、 $\phi_2 = 0.983957$ とすることによって波長980nmで反射率11.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3/A d_1/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2 = 50\text{ nm}/78.20\text{ nm}/110.84\text{ nm}/140.35\text{ nm}/198.94\text{ nm}/137.01\text{ nm}/194.21\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は909.55nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1651.45nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約6.74倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0221】

図91は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の11%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長963nmから1254nmにわ

たって反射率は10.4%から12.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980nmの反射率11.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率9.5%～12.0%の範囲の連続した波長帯域幅は291nmである。この波長帯域幅を設定波長980nmで割った値は約0.297であり、仮想单層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0222】

実施の形態82.

本発明の実施の形態82に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図92を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態91に係る半導体光素子と比較すると、パラメータA=1.15、B=2.10、C=2.05とし、設定波長 $\lambda=862\text{ nm}$ で設定反射率R(λ)を11.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1=0.856738$ 、 $\phi_2=0.989623$ とすることによって波長862nmで反射率11.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3/A d_1/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2=50\text{ nm}/65.71\text{ nm}/96.38\text{ nm}/119.99\text{ nm}/176.00\text{ nm}/117.14\text{ nm}/171.81\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total}=\sum d_i$)は797.03nmである。それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和 $\sum n_i d_i$ は、1446.13nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約5.90倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0223】

図92は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の11%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長850nmから1110nmにわたって反射率は9.5から12.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長862nmの設定反射率11.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率9.5%～12.0%の範囲の連続した波長帯域幅は260nmである。この波長帯域幅を設定波長862nmで割った値は約0.302であり、仮想单層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0224】

実施の形態83.

本発明の実施の形態83に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図93を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態25に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda=980\text{ nm}$ で設定反射率R(λ)を12.0%としている点で相違する。また、パラメータはA=1.22、B=2.13、C=2.05としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1=0.815005$ 、 $\phi_2=1.02518$ とすることによって波長980nmで反射率12.0%とすることができる。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3/A d_1/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2=50\text{ nm}/75.39\text{ nm}/120.42\text{ nm}/131.63\text{ nm}/210.24\text{ nm}/126.69\text{ nm}/202.34\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total}=\sum d_i$)は916.71nmである。それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和 $\sum n_i d_i$ は、1653.50nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約6.75倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0225】

図93は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の12%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長962nmから1275nmにわ

たって反射率は10.7%から13.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980nmの反射率12.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率10.5%～13.0%の範囲の連続した波長帯域幅は313nmである。この波長帯域幅を設定波長980nmで割った値は約0.319であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0226】

実施の形態84.

本発明の実施の形態84に係る3種類の膜を含む7層反射膜を備えた半導体光素子について、図94を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態83に係る半導体光素子と比較すると、パラメータはA=1.13、B=2.10、C=2.05とし、設定波長 $\lambda=853\text{ nm}$ で設定反射率R(λ)を12.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1=0.842465$ 、 $\phi_2=1.02038$ とすることによって波長853nmで反射率12.0%とすることができます。この場合、7層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3/A d_1/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2=50\text{ nm}/62.83\text{ nm}/96.63\text{ nm}/116.76\text{ nm}/179.57\text{ nm}/113.98\text{ nm}/175.30\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total}=\sum d_i$)は795.07nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1438.90nmであり、所定波長980nmの1/4波長(=245nm)の約5.87倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0227】

図94は、この7層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この7層反射膜は、設定反射率の12%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長838nmから1116nmにわたって反射率は10.6%から13.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長853nmの設定反射率12.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率10.5%～13.0%の範囲の連続した波長帯域幅は278nmである。この波長帯域幅を設定波長853nmで割った値は約0.326であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この7層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0228】

以下に、実施の形態71から実施の形態84に係る半導体光素子の多層反射膜の特性について、表8に示した。表8には、多層反射膜の特性として、多層反射膜の構成、設定波長 λ 及び設定反射率R(λ)、極小反射率、 $\sum n_i d_i$ 及び所定波長980nmの1/4波長(245nm)との対比、R(λ)の-1.5～+1.0%の範囲となる波長帯域幅 $\Delta\lambda$ 、 $\Delta\lambda/\lambda$ について示した。

【0229】

【表8】

表8

多層反射膜の特性						
実施の形態	多層反射膜の構成	設定波長 λ 設定反射率 $R(\lambda)$	極小反射率	$\sum n_i d_i$ 、 波長980nmの 1/4 波長 (245nm)との 対比	$R(\lambda)$ の -1.5~1.0% となる波長 帯域 $\Delta\lambda$	$\Delta\lambda/\lambda$
71	7層膜 (3種類)	980nm 6 %	5.4%	1639.85nm 6.69倍	221nm	221/980=0.226
72	7層膜 (3種類)	889nm 6 %	5.2%	1479.24nm 6.04倍	204nm	204/889=0.229
73	7層膜 (3種類)	980nm 7 %	6.4%	1636.96nm 6.68倍	229nm	229/980=0.234
74	7層膜 (3種類)	886nm 7 %	6.0%	1471.83nm 6.01倍	211nm	211/886=0.238
75	7層膜 (3種類)	980nm 8 %	7.5%	1642.23nm 6.70倍	240nm	240/980=0.245
76	7層膜 (3種類)	881nm 8 %	7.1%	1467.89nm 5.99倍	221nm	221/881=0.251
77	7層膜 (3種類)	980nm 9 %	8.4%	1643.29nm 6.71倍	255nm	255/980=0.260
78	7層膜 (3種類)	874nm 9 %	7.9%	1456.86nm 5.95倍	233nm	233/874=0.267
79	7層膜 (3種類)	980nm 10 %	9.6%	1649.03nm 6.73倍	272nm	272/980=0.278
80	7層膜 (3種類)	868nm 10 %	8.7%	1451.38nm 5.92倍	246nm	246/868=0.283
81	7層膜 (3種類)	980nm 11 %	10.4%	1651.45nm 6.74倍	291nm	291/980=0.297
82	7層膜 (3種類)	862nm 11 %	9.5%	1446.13nm 5.90倍	260nm	260/862=0.320
83	7層膜 (3種類)	980nm 12 %	10.7%	1653.50nm 6.75倍	313nm	313/980=0.319
84	7層膜 (3種類)	853nm 12 %	10.6%	1438.90nm 5.87倍	278nm	278/853=0.326

【0230】

実施の形態85.

本発明の実施の形態85に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図95を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態33に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を6.0%としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.10$ 、 $A = 2.7$ 、 $B = 2.1$ 、 $C = 2.0$ 、 $D = 2.0$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.429458$ 、 $\phi_2 = 0.889116$ とすることによって波長980nmで反射率6.0%とすることができます。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 8.56\text{ nm} / 87.92\text{ nm} / 231.13\text{ nm} / 68.38\text{ nm} / 179.77\text{ nm} / 65.13\text{ nm} / 171.21\text{ nm} / 65.13\text{ nm} / 171.21\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は1048.44nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 n_i

d_i の総和 $\sum n_i d_i$ は、1823.70 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 7.44 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0231】

図 95 は、この 9 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 9 層反射膜は、設定反射率の 6 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 893 nm から 993 nm にわたって反射率は 5.1 % から 7.0 % の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 6.0 % を基準として、-1.5 % から +1.0 % の範囲、即ち、反射率 4.5 % ~ 7.0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 100 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.102 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 9 層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0232】

実施の形態 8.6.

本発明の実施の形態 8.6 に係る 9 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 96 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 8.5 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1018$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 6.0 % としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.429458$ 、 $\phi_2 = 0.889116$ とすることによって波長 1018 nm で反射率 6.0 % とすることができる。この場合、9 層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 8.89$ nm / 91.33 nm / 240.09 nm / 71.04 nm / 186.74 nm / 67.65 nm / 177.85 nm / 67.65 nm / 177.85 nm である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 1089.09 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1857.42 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 7.73 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0233】

図 96 は、この 9 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 9 層反射膜は、設定反射率の 6 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 928 nm から 1031 nm にわたって反射率は 5.1 % から 7.0 % の範囲内に収まっている。また、設定波長 1018 nm の設定反射率 6.0 % を基準として、-1.5 % から +1.0 % の範囲、即ち、反射率 4.5 % ~ 7.0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 103 nm である。この波長帯域幅を設定波長 1018 nm で割った値は約 0.101 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 9 層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0234】

実施の形態 8.7.

本発明の実施の形態 8.7 に係る 9 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 97 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 3.3 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 7.0 % としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.10$ 、 $A = 2.7$ 、 $B = 2.15$ 、 $C = 1.9$ 、 $D = 1.9$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.413831$ 、 $\phi_2 = 0.91752$ とすることによって波長 980 nm で反射率 7.0 % とすることができる。この場合、9 層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 8.83$ nm / 84.72 nm / 238.51 nm / 65.90 nm / 185.51 nm / 59.62 nm / 167.84 nm である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$)

$\sum d_i$) は 1038.39 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1800.12 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 7.35 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0235】

図 97 は、この 9 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 9 層反射膜は、設定反射率の 7 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 898 nm から 993 nm にわたって反射率は 6.3 % から 8.0 % の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 7.0 % を基準として、-1.5 % から +1.0 % の範囲、即ち、反射率 5.5 % ~ 8.0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 95 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.097 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 9 層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0236】

実施の形態 8.8.

本発明の実施の形態 8.8 に係る 9 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 98 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 8.7 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1016$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 7.0 % としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.413831$ 、 $\phi_2 = 0.91752$ とすることによって波長 1016 nm で反射率 7.0 % とすることができます。この場合、9 層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 9.16$ nm / 87.83 nm / 247.27 nm / 68.32 nm / 192.32 nm / 61.81 nm / 174.01 nm / 61.81 nm / 174.01 nm である。全体の膜厚 ($d_{tota} = \sum d_i$) は 1076.54 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1866.25 nm であり、所定波長 980 nm の 1/4 波長 (= 245 nm) の約 7.62 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0237】

図 98 は、この 9 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 9 層反射膜は、設定反射率の 7 % 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 931 nm から 1029 nm にわたって反射率は 6.3 % から 8.0 % の範囲内に収まっている。また、設定波長 1016 nm の設定反射率 7.0 % を基準として、-1.5 % から +1.0 % の範囲、即ち、反射率 5.5 % ~ 8.0 % の範囲の連続した波長帯域幅は 98 nm である。この波長帯域幅を設定波長 1016 nm で割った値は約 0.096 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 9 層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0238】

実施の形態 8.9.

本発明の実施の形態 8.9 に係る 9 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 99 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 3.3 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 8.0 % としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.10$ 、 $A = 2.70$ 、 $B = 2.10$ 、 $C = 2.05$ 、 $D = 1.80$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.395103$ 、 $\phi_2 = 0.933593$ とすることによって波長 980 nm で反射率 8.0 % とすることができます。この場合、9 層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 8.99$ nm / 80.89 nm / 242.69 nm / 62.91 nm / 188.76 nm / 61.42 nm

$m/184.27nm/53.93nm/161.79nm$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は $1045.65nm$ である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 $1807.20nm$ であり、所定波長 $980nm$ の $1/4$ 波長 (= $245nm$) の約 7.38 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0239】

図99は、この9層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、設定反射率の8%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 $886nm$ から $991nm$ にわたって反射率は 7.0% から 9.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 $980nm$ の反射率 8.0% を基準として、 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲、即ち、反射率 6.5% ～ 9.0% の範囲の連続した波長帯域幅は $105nm$ である。この波長帯域幅を設定波長 $980nm$ で割った値は約 0.107 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この9層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0240】

実施の形態90.

本発明の実施の形態90に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図100を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態89に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1023nm$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 8.0% としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.395103$ 、 $\phi_2 = 0.933593$ とすることによって波長 $1023nm$ で反射率 8.0% とすることができます。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 9.38nm / 84.44nm / 253.34nm / 65.67nm / 197.04nm / 64.11nm / 192.35nm / 56.29nm / 168.89nm$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は $1091.51nm$ である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 $1886.46nm$ であり、所定波長 $980nm$ の $1/4$ 波長 (= $245nm$) の約 7.70 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0241】

図100は、この9層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、設定反射率の8%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 $925nm$ から $1034nm$ にわたって反射率は 7.0% から 9.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 $1023nm$ の設定反射率 8.0% を基準として、 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲、即ち、反射率 6.5% ～ 9.0% の範囲の連続した波長帯域幅は $109nm$ である。この波長帯域幅を設定波長 $1023nm$ で割った値は約 0.107 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この9層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0242】

実施の形態91.

本発明の実施の形態91に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図101を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態33に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980nm$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 9.0% としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.10$ 、 $A = 2.70$ 、 $B = 2.10$ 、 $C = 2.15$ 、 $D = 1.75$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.392646$ 、 $\phi_2 = 0.930741$ とすることによって波長 $980nm$ で反射率 9.0% とすることができます。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 8.96nm$

$/80.39\text{ nm}/241.95\text{ nm}/62.52\text{ nm}/188.16\text{ nm}/64.01\text{ nm}/192.66\text{ nm}/52.10\text{ nm}/156.82\text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 1047.59 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i の積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1810.29 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($=245\text{ nm}$) の約 7.39 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0243】

図101は、この9層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、設定反射率の9%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 872 nm から 990 nm にわたって反射率は 7.8% から 10.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 980 nm の反射率 9.0% を基準として、 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲、即ち、反射率 7.5% ～ 10.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 118 nm である。この波長帯域幅を設定波長 980 nm で割った値は約 0.120 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この9層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0244】

実施の形態92.

本発明の実施の形態92に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図102を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態91に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1031\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 9.0% としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.392646$ 、 $\phi_2 = 0.930741$ とすることによって波長 1031 nm で反射率 9.0% とすることができます。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 9.43\text{ nm}/84.57\text{ nm}/254.54\text{ nm}/65.78\text{ nm}/197.98\text{ nm}/67.34\text{ nm}/202.69\text{ nm}/54.81\text{ nm}/164.98\text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 1102.12 nm である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i の積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 1904.52 nm であり、所定波長 980 nm の $1/4$ 波長 ($=245\text{ nm}$) の約 7.77 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0245】

図102は、この9層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、設定反射率の9%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 918 nm から 1041 nm にわたって反射率は 7.8% から 10.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 1031 nm の設定反射率 9.0% を基準として、 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲、即ち、反射率 7.5% ～ 10.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 123 nm である。この波長帯域幅を設定波長 1031 nm で割った値は約 0.119 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この9層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0246】

実施の形態93.

本発明の実施の形態93に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図103を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態33に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 10.0% としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.10$ 、 $A = 2.75$ 、 $B = 2.10$ 、 $C = 2.25$ 、 $D = 1.75$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.394052$ 、 $\phi_2 = 0.907302$ とすることによって波長 980 nm で反射率 10.0% とすることができます。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は

$O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 8.74$
 $n m / 82.17 n m / 240.22 n m / 62.75 n m / 183.44 n m / 67.33 n m / 196.55 n m / 52.29 n m / 152.87 n m$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は $1046.36 n m$ である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 $1810.50 n m$ であり、所定波長 $980 n m$ の $1/4$ 波長 ($= 245 n m$) の約 7.39 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0247】

図103は、この9層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、設定反射率の9%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 $866 n m$ から $990 n m$ にわたって反射率は 8.7% から 11.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 $980 n m$ の反射率 10.0% を基準として、 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲、即ち、反射率 8.5% ～ 11.0% の範囲の連続した波長帯域幅は $124 n m$ である。この波長帯域幅を設定波長 $980 n m$ で割った値は約 0.127 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この9層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0248】

実施の形態94.

本発明の実施の形態94に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図104を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態93に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1035 n m$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 10.0% としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.394052$ 、 $\phi_2 = 0.907302$ とすることによって波長 $1035 n m$ で反射率 10.0% とすることができる。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 9.23 n m / 86.78 n m / 253.71 n m / 66.27 n m / 193.74 n m / 71.00 n m / 207.58 n m / 55.22 n m / 161.45 n m$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は $1104.98 n m$ である。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 $1912.11 n m$ であり、所定波長 $980 n m$ の $1/4$ 波長 ($= 245 n m$) の約 7.80 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0249】

図104は、この9層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、設定反射率の 10% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 $914 n m$ から $1045 n m$ にわたって反射率は 8.7% から 11.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 $1035 n m$ の設定反射率 10.0% を基準として、 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲、即ち、反射率 8.5% ～ 11.0% の範囲の連続した波長帯域幅は $131 n m$ である。この波長帯域幅を設定波長 $1035 n m$ で割った値は約 0.127 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この9層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0250】

実施の形態95.

本発明の実施の形態95に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図105を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 980 n m$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 11.0% としている点で相違する。また、パラメータは $O = 0.10$ 、 $A = 2.80$ 、 $B = 2.10$ 、 $C = 2.35$ 、 $D = 1.75$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.395641$ 、 $\phi_2 = 0.88414$ とすることによって波長 $980 n m$

で反射率11.0%とすることができます。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚はO d₂ / A d₁ / A d₂ / B d₁ / B d₂ / C d₁ / C d₂ / D d₁ / D d₂ = 8.51 nm / 84.00 nm / 238.35 nm / 63.00 nm / 178.76 nm / 70.50 nm / 200.04 nm / 52.50 nm / 148.97 nmである。全体の膜厚 (d_{total} = $\sum d_i$) は 1044.63 nmである。それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和 $\sum n_i d_i$ は、1810.29 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長 (= 245 nm) の約7.39倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0251】

図105は、この9層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、設定反射率の11%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長856 nmから990 nmにわたって反射率は9.7%から12.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980 nmの反射率11.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率9.5%～12.0%の範囲の連続した波長帯域幅は134 nmである。この波長帯域幅を設定波長980 nmで割った値は約0.137であり、仮想单層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この9層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0252】

実施の形態96.

本発明の実施の形態96に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図106を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態95に係る半導体光素子と比較すると、設定波長λ = 1040 nmで設定反射率R(λ)を11.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化φ₁及びφ₂を、φ₁ = 0.395641、φ₂ = 0.88414とすることによって波長1040 nmで反射率11.0%とすることができます。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚はO d₂ / A d₁ / A d₂ / B d₁ / B d₂ / C d₁ / C d₂ / D d₁ / D d₂ = 9.03 nm / 89.14 nm / 252.94 nm / 66.86 nm / 189.71 nm / 74.81 nm / 212.29 nm / 55.71 nm / 158.09 nmである。全体の膜厚 (d_{total} = $\sum d_i$) は 1108.58 nmである。それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和 $\sum n_i d_i$ は、1921.11 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長 (= 245 nm) の約7.84倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0253】

図106は、この9層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、設定反射率の11%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長909 nmから1050 nmにわたって反射率は9.7%から12.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長1040 nmの設定反射率11.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率9.5%～12.0%の範囲の連続した波長帯域幅は141 nmである。この波長帯域幅を設定波長1040 nmで割った値は約0.136であり、仮想单層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この9層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0254】

実施の形態97.

本発明の実施の形態97に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図107を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、設定波長λ = 980 nmで設定反射率R(λ)を12.0%としている点で相違する。また、パラメータはO = 0.10、A = 2.85、B = 2.10、C = 2.42、D = 1.75としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化φ₁及びφ₂

を、 $\phi_1 = 0.39697$ 、 $\phi_2 = 0.864124$ とすることによって波長980 nmで反射率12.0%とすることができます。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 8.32 \text{ nm} / 85.79 \text{ nm} / 237.11 \text{ nm} / 63.21 \text{ nm} / 174.71 \text{ nm} / 72.84 \text{ nm} / 201.34 \text{ nm} / 52.68 \text{ nm} / 145.60 \text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は1041.60 nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1807.36 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長(=245 nm)の約7.38倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0255】

図107は、この9層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、設定反射率の12%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長852 nmから990 nmにわたって反射率は10.8%から13.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長980 nmの反射率12.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率10.5%～13.0%の範囲の連続した波長帯域幅は138 nmである。この波長帯域幅を設定波長980 nmで割った値は約0.141であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この9層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0256】

実施の形態98.

本発明の実施の形態98に係る9層反射膜を備えた半導体光素子について、図108を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態97に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 1043 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を12.0%としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.39697$ 、 $\phi_2 = 0.864124$ とすることによって波長1043 nmで反射率12.0%とすることができます。この場合、9層反射膜のそれぞれの膜厚は $O d_2 / A d_1 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 8.85 \text{ nm} / 91.30 \text{ nm} / 252.35 \text{ nm} / 67.27 \text{ nm} / 185.95 \text{ nm} / 77.53 \text{ nm} / 214.28 \text{ nm} / 56.06 \text{ nm} / 154.95 \text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{total} = \sum d_i$)は1108.54 nmである。それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1923.51 nmであり、所定波長980 nmの1/4波長(=245 nm)の約7.85倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0257】

図108は、この9層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この9層反射膜は、設定反射率の12%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長907 nmから1053 nmにわたって反射率は10.8%から13.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長1043 nmの設定反射率12.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、反射率10.5%～13.0%の範囲の連続した波長帯域幅は146 nmである。この波長帯域幅を設定波長1043 nmで割った値は約0.140であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この9層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0258】

以下に、実施の形態85から実施の形態98に係る半導体光素子の多層反射膜の特性について、表9に示した。表9には、多層反射膜の特性として、多層反射膜の構成、設定波長 λ 及び設定反射率 $R(\lambda)$ 、極小反射率、 $\sum n_i d_i$ 及び所定波長980 nmの1/4波長(245 nm)との対比、 $R(\lambda)$ の-1.5～+1.0%の範囲となる波長帯域幅 $\Delta \lambda$ 、 $\Delta \lambda / \lambda$ について示した。

【0259】

【表9】

表9

実施の形態	多層反射膜の特性					
	多層反射膜の構成	設定波長 λ	極小反射率 $R(\lambda)$	$\sum n_i d_i$ 、波長980nmの1/4波長(245nm)との対比	$R(\lambda)$ の-1.5~1.0%となる波長帯域 $\Delta\lambda$	$\Delta\lambda/\lambda$
85	9層膜	980nm 6%	5.1%	1823.70nm 7.44倍	100nm	100/980=0.102
86	9層膜	1018nm 6%	5.1%	1857.42nm 7.73倍	103nm	103/1018=0.101
87	9層膜	980nm 7%	6.3%	1800.12nm 7.35倍	95nm	95/980=0.097
88	9層膜	1016nm 7%	6.3%	1866.25nm 7.62倍	98nm	98/1016=0.096
89	9層膜	980nm 8%	7.0%	1807.20nm 7.38倍	105nm	105/980=0.107
90	9層膜	1023nm 8%	7.0%	1886.46nm 7.70倍	109nm	109/1023=0.107
91	9層膜	980nm 9%	7.8%	1810.29nm 7.39倍	118nm	118/980=0.120
92	9層膜	1031nm 9%	7.8%	1904.52nm 7.77倍	123nm	123/1031=0.119
93	9層膜	980nm 10%	8.7%	1810.50nm 7.39倍	124nm	124/980=0.127
94	9層膜	1035nm 10%	8.7%	1912.11nm 7.80倍	131nm	131/1035=0.127
95	9層膜	980nm 11%	9.7%	181029nm 7.39倍	134nm	134/980=0.137
96	9層膜	1040nm 11%	9.7%	1921.11nm 7.84倍	141nm	141/1040=0.136
97	9層膜	980nm 12%	10.8%	1807.36nm 7.38倍	138nm	138/980=0.141
98	9層膜	1043nm 12%	10.8%	1923.51nm 7.85倍	146nm	146/1043=0.140

【0260】

実施の形態99。

本発明の実施の形態99に係る8層反射膜を備えた半導体光素子について図109及び図110を用いて説明する。図109は、半導体光素子の端面部の反射膜として、単層反射膜に代えて3種類の膜からなる8層反射膜70を設けた場合の構成を示す概略断面図である。この半導体光素子は、実施の形態1に係る半導体光素子と比較すると、多層反射膜が3種類の膜からなる8層反射膜70で構成されている点で相違する。さらに詳細には、導波層10に接する第1層膜及び第2層膜がそれぞれアルミナ及び石英と、半導体レーザの等価屈折率より小さい屈折率である点で相違する。なお、第3層膜から第8層膜にかけては酸化タンタル及び石英が交互に積層されている。

【0261】

この3種類の膜を含む8層反射膜70の反射率が所定波長で前記仮想単層膜の反射率と同一に設定する条件について検討する。ここでは、導波層10に接する第1層膜に第3の

種類の膜を用いた場合について検討する。この第3の膜の位相変化 ϕ_3 は、下記式(20)で表される。

【数21】

$$\phi_3 = \frac{2\pi}{\lambda} n_3 d_3 \quad (20)$$

【0262】

そこで、この3種類の膜からなる8層反射膜70の振幅反射率は、上記7層反射膜と同様に下記式(21)で表される。

【数22】

$$r = \frac{(m_{11} + m_{12})n_c - (m_{21} + m_{22})}{(m_{11} + m_{12})n_c + (m_{21} + m_{22})} \quad (21)$$

【0263】

ここで、 $m_{i,j}$ (i, j は1又は2) は下記式(22)で表される。

【数23】

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \cos \phi_3 & -\frac{i}{n_3} \sin \phi_3 \\ -in_3 \sin \phi_3 & \cos \phi_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos A\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin A\phi_2 \\ -n_2 \sin A\phi_2 & \cos A\phi_2 \end{pmatrix} \\ &\times \begin{pmatrix} \cos B\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin B\phi_1 \\ -in_1 \sin B\phi_1 & \cos B\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos B\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin B\phi_2 \\ -n_2 \sin B\phi_2 & \cos B\phi_2 \end{pmatrix} \\ &\times \begin{pmatrix} \cos C\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin C\phi_1 \\ -in_1 \sin C\phi_1 & \cos C\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos C\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin C\phi_2 \\ -n_2 \sin C\phi_2 & \cos C\phi_2 \end{pmatrix} \\ &\times \begin{pmatrix} \cos D\phi_1 & -\frac{i}{n_1} \sin D\phi_1 \\ -in_1 \sin D\phi_1 & \cos D\phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos D\phi_2 & -\frac{i}{n_2} \sin D\phi_2 \\ -n_2 \sin D\phi_2 & \cos D\phi_2 \end{pmatrix} \quad (22) \end{aligned}$$

【0264】

なお、A, B, C, Dは、第2層膜72の膜厚A d₂、第3層膜73の膜厚B d₁、第4層膜74の膜厚B d₂、第5層膜75の膜厚C d₁、第6層膜76の膜厚C d₂、第7層膜77の膜厚D d₁、第8層膜78の膜厚D d₂とした場合の、それぞれの2層膜(ペア)の寄与率を表すパラメータである。ただし、Aは第2層膜の寄与率のみを表す。

【0265】

以下、半導体光素子の端面部に3種類の膜を含む8層反射膜70を設けた場合について説明する。図109は、端面部に設けた3種類の膜を含む8層反射膜70の構成を示す概略断面図である。この半導体光素子では、導波層10(等価屈折率n_c=3.37)の端面部に順に、アルミナの第1層膜71(屈折率n₃=1.636、膜厚d₃=10nm)、石英の第2層膜72(屈折率n₂=1.457、膜厚A d₂)、酸化タンタルの第3層膜73(屈折率n₁=2.072、膜厚B d₁)、石英の第4層膜74(屈折率n₂=1.457、膜厚B d₂)、酸化タンタルの第5層膜75(屈折率n₁=2.072、膜厚C d₁)、石英の第6層膜76(屈折率n₂=1.457、膜厚C d₂)、酸化タンタルの第7層膜77(屈折率n₁=2.072、膜厚D d₁)、石英の第8層膜78(屈折率n₂=1.457、膜厚D d₂)が積層されている。さらに、この8層反射膜70は、空気等の自由空間5に接している。

【0266】

この半導体光素子の端面部の8層反射膜70の反射特性について説明する。まず、設定波長λ=808nmで設定反射率R(λ)を4.0%とする。各パラメータを、A=0.

32、B=1.96、C=1.85、D=2.00とした場合、酸化タンタル及び石英の位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 が、それぞれ $\phi_1=0.356684$ 、 $\phi_2=1.26875$ である場合に波長808nmで反射率4.0%が得られる。この場合、8層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2/D d_1/D d_2=10\text{ nm}/35.83\text{ nm}/43.39\text{ nm}/219.49\text{ nm}/40.95\text{ nm}/207.17\text{ nm}/44.27\text{ nm}/223.96\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{\text{total}}=\sum d_i$)は825.06nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、2108.54nmであり、所定波長808nmの1/4波長(=202nm)の約10.44倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0267】

図110は、この8層反射膜70の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この8層反射膜は、所定反射率の4.0%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長802nmから941nmにわたって反射率は2.6%から5.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長808nmの反射率4.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、2.5%～5.0%の範囲の連続した波長帯域幅は139nmである。この波長帯域幅を設定波長808nmで割った値は約0.172であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この8層反射膜は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0268】

実施の形態100.

本発明の実施の形態100に係る8層反射膜を備えた半導体光素子について、図111を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態99に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda=744\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を4.0%としている点で相違する。また、パラメータはB=1.95としている点で相違する。また、酸化タンタル及び石英のそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1=0.361744$ 、 $\phi_2=1.26093$ とすることによって波長744nmで反射率4.0%とすることができます。この場合、8層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2/D d_1/D d_2=10\text{ nm}/32.79\text{ nm}/40.31\text{ nm}/199.83\text{ nm}/38.25\text{ nm}/189.58\text{ nm}/41.35\text{ nm}/204.95\text{ nm}$ である。全体の膜厚($d_{\text{total}}=\sum d_i$)は757.06nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、1949.67nmであり、所定波長808nmの1/4波長(=202nm)の約9.65倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0269】

図111は、この8層反射膜70の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この8層反射膜は、所定反射率の4.0%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長738nmから869nmにわたって反射率は2.5%から5.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長744nmの設定反射率4.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、2.5%～5.0%の範囲の連続した波長帯域幅は131nmである。この波長帯域幅を設定波長744nmで割った値は約0.176であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この8層反射膜70は、広い波長帯域にわたって低反射率の平坦部を有していることがわかる。

【0270】

実施の形態101.

本発明の実施の形態101に係る8層反射膜を備えた半導体光素子について、図112を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態99に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda=808\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を8.0%としている点で相違する。

また、パラメータは $A = 0.20$ 、 $B = 2.00$ 、 $C = 2.00$ 、 $D = 2.00$ としている。さらに、酸化タンタル及び石英のそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.374385$ 、 $\phi_2 = 1.26121$ とすることによって波長 808 nm で反射率 8.0% とすることができる。この場合、8層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3/A d_2/B d_1/C d_1/C d_2/D d_1/D d_2 = 10\text{ nm}/22.26\text{ nm}/46.47\text{ nm}/222.63\text{ nm}/46.47\text{ nm}/222.63\text{ nm}/46.47\text{ nm}/222.63\text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 839.56 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 2177.34 nm であり、所定波長 808 nm の $1/4$ 波長 ($= 202\text{ nm}$) の約 10.78 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0271】

図112は、この8層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この8層反射膜は、所定反射率の 8.0% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 801 nm から 946 nm にわたって反射率は 6.6% から 9.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 808 nm の反射率 8.0% を基準として、 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲、即ち、 $6.5\% \sim 9.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 145 nm である。この波長帯域幅を設定波長 808 nm で割った値は約 0.179 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この8層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0272】

実施の形態102.

本発明の実施の形態102に係る8層反射膜を備えた半導体光素子について、図113を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態101に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 753\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 8.0% として、パラメータは $A = 0.19$ としている点で相違する。また、酸化タンタル及び石英のそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.370822$ 、 $\phi_2 = 1.26896$ とすることによって波長 753 nm で反射率 8.0% とすることができる。この場合、8層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3/A d_2/B d_1/C d_1/C d_2/D d_1/D d_2 = 10\text{ nm}/19.83\text{ nm}/42.90\text{ nm}/208.75\text{ nm}/42.90\text{ nm}/208.75\text{ nm}/42.90\text{ nm}/208.75\text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 784.78 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 2024.36 nm であり、所定波長 808 nm の $1/4$ 波長 ($= 202\text{ nm}$) の約 10.02 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0273】

図113は、この8層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この8層反射膜は、所定反射率の 8.0% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 746 nm から 870 nm にわたって反射率は 6.7% から 9.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 753 nm の設定反射率 8.0% を基準として、 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲、即ち、 $6.5\% \sim 9.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 124 nm である。この波長帯域幅を設定波長 753 nm で割った値は約 0.165 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この8層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0274】

実施の形態103.

本発明の実施の形態103に係る8層反射膜を備えた半導体光素子について、図114を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態99に係る半導体光素子と比較する

と、設定波長 $\lambda = 808\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 12.0% としている点で相違する。また、パラメータは $A = 0.14$ 、 $B = 1.95$ 、 $C = 1.80$ 、 $D = 2.00$ としている。さらに、酸化タンタル及び石英のそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.403695$ 、 $\phi_2 = 1.34024$ とすることによって波長 808 nm で反射率 12.0% とすることができます。この場合、8層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2/D d_1/D d_2 = 10\text{ nm}/16.56\text{ nm}/48.86\text{ nm}/230.67\text{ nm}/45.10\text{ nm}/212.93\text{ nm}/50.11\text{ nm}/236.58\text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 850.81 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i の積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 2264.47 nm であり、所定波長 808 nm の $1/4$ 波長 ($= 202\text{ nm}$) の約 11.21 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0275】

図 113 は、この 8 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 8 層反射膜は、所定反射率の 12.0% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 801 nm から 1037 nm にわたって反射率は 10.7% から 13.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 808 nm の反射率 12.0% を基準として、 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲、即ち、 $10.5\% \sim 13.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 236 nm である。この波長帯域幅を設定波長 808 nm で割った値は約 0.292 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 8 層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0276】

実施の形態 104.

本発明の実施の形態 104 に係る 8 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 115 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 103 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 706\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 12.0% として、パラメータは $B = 1.93$ としている点で相違する。また、酸化タンタル及び石英のそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.412469$ 、 $\phi_2 = 1.3303$ とすることによって波長 706 nm で反射率 12.0% とすることができます。この場合、8 層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3/A d_2/B d_1/B d_2/C d_1/C d_2/D d_1/D d_2 = 10\text{ nm}/14.43\text{ nm}/43.49\text{ nm}/198.96\text{ nm}/40.56\text{ nm}/185.56\text{ nm}/45.06\text{ nm}/206.18\text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 744.24 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i の積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、 2005.83 nm であり、所定波長 808 nm の $1/4$ 波長 ($= 202\text{ nm}$) の約 9.93 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0277】

図 115 は、この 8 層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この 8 層反射膜は、所定反射率の 12.0% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 707 nm から 908 nm にわたって反射率は 10.9% から 13.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 706 nm の設定反射率 12.0% を基準として、 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲、即ち、 $10.5\% \sim 13.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 201 nm である。この波長帯域幅を設定波長 706 nm で割った値は約 0.285 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この 8 層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0278】

実施の形態 105.

本発明の実施の形態 105 に係る 8 層反射膜を備えた半導体光素子について、図 116

及び図117を用いて説明する。図116は、半導体光素子の端面部の反射膜として、単層反射膜に代えて3種類の膜からなる8層反射膜80を設けた場合の構成を示す概略断面図である。この半導体光素子は、実施の形態99に係る半導体光素子と比較すると、導波層10に接する第1層膜及び第2層膜がそれぞれ石英及びアルミナであり、第3層膜から第8層膜にかけて酸化タンタルおよびアルミナが積層されている点で相違する。

【0279】

以下、半導体光素子の端面部に3種類の膜を含む8層反射膜80を設けた場合について説明する。図116は、端面部に設けた3種類の膜を含む8層反射膜の構成を示す概略断面図である。この半導体光素子では、導波層10（等価屈折率 $n_c = 3.37$ ）の端面部に順に、石英の第1層膜81（屈折率 $n_3 = 1.457$ 、膜厚 $d_3 = 5\text{ nm}$ ）、アルミナの第2層膜82（屈折率 $n_2 = 1.636$ 、膜厚 $A d_2$ ）、酸化タンタルの第3層膜83（屈折率 $n_1 = 2.072$ 、膜厚 $B d_1$ ）、アルミナの第4層膜84（屈折率 $n_2 = 1.636$ 、膜厚 $B d_2$ ）、酸化タンタルの第5層膜85（屈折率 $n_1 = 2.072$ 、膜厚 $C d_1$ ）、アルミナの第6層膜86（屈折率 $n_2 = 1.636$ 、膜厚 $C d_2$ ）、酸化タンタルの第7層膜87（屈折率 $n_1 = 2.072$ 、膜厚 $D d_1$ ）、アルミナの第8層膜88（屈折率 $n_2 = 1.636$ 、膜厚 $D d_2$ ）が積層されている。さらに、この8層膜80は、空気等の自由空間5に接している。

【0280】

この半導体光素子の端面部の8層反射膜80の反射特性について説明する。まず、ここでは設定波長808nmで設定反射率 $R(\lambda)$ を4.0%にする。各パラメータを、 $A = 0.22$ 、 $B = 2.00$ 、 $C = 2.16$ 、 $D = 2.00$ とした場合、酸化タンタル及びアルミナの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 が、それぞれ $\phi_1 = 0.44218$ 、 $\phi_2 = 1.18776$ である場合に、波長808nmで反射率4.0%が得られる。この場合、8層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 5\text{ nm} / 20.54\text{ nm} / 54.89\text{ nm} / 186.73\text{ nm} / 59.28\text{ nm} / 201.67\text{ nm} / 54.89\text{ nm} / 186.73\text{ nm}$ である。全体の膜厚（ $d_{total} = \sum d_i$ ）は769.73nmである。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、2355.68nmであり、所定波長808nmの1/4波長（=202nm）の約11.66倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0281】

図117は、この8層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この8層反射膜は、所定反射率の4.0%前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長800nmから1032nmにわたって反射率は2.7%から5.0%の範囲内に収まっている。また、設定波長808nmの反射率4.0%を基準として、-1.5%から+1.0%の範囲、即ち、2.5%～5.0%の範囲の連続した波長帯域幅は232nmである。この波長帯域幅を設定波長808nmで割った値は約0.287であり、仮想単層反射膜の場合の0.065より大きい。そこで、この8層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0282】

実施の形態106。

本発明の実施の形態106に係る8層反射膜を備えた半導体光素子について、図118を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態105に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 716\text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を4.0%として、パラメータを $A = 0.17$ 、 $B = 2.03$ 、 $C = 2.24$ 、としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.455795$ 、 $\phi_2 = 1.15938$ とすることによって波長716nmで反射率4.0%とすることができる。この場合、8層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 5\text{ nm} / 13.73\text{ nm} / 50.89\text{ nm} / 163.94\text{ nm} /$

56. 15 nm/180. 89 nm/50. 01 nm/161. 11 nmである。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 681. 72 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、2115. 46 nm であり、所定波長 808 nm の $1/4$ 波長 (= 202 nm) の約 10. 47 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0283】

図118は、この8層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この8層反射膜は、所定反射率の4. 0% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 709 nm から 906 nm にわたって反射率は 3. 0% から 5. 0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 716 nm の設定反射率 4. 0% を基準として、-1. 5% から +1. 0% の範囲、即ち、2. 5% ~ 5. 0% の範囲の連続した波長帯域幅は 197 nm である。この波長帯域幅を設定波長 716 nm で割った値は約 0. 275 であり、仮想单層反射膜の場合の 0. 065 より大きい。そこで、この8層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0284】

実施の形態107.

本発明の実施の形態107に係る8層反射膜を備えた半導体光素子について、図119を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態105に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 808$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 8. 0% としている点で相違する。また、パラメータは $A = 0. 20$ 、 $B = 2. 00$ 、 $C = 2. 60$ 、 $D = 2. 00$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0. 703895$ 、 $\phi_2 = 0. 563728$ とすることによって波長 808 nm で反射率 8. 0% とすることができます。この場合、8層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 5\text{ nm} / 8. 86\text{ nm} / 87. 37\text{ nm} / 88. 62\text{ nm} / 113. 59\text{ nm} / 115. 21\text{ nm} / 87. 37\text{ nm} / 88. 62\text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 594. 64 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、2726. 92 nm であり、所定波長 808 nm の $1/4$ 波長 (= 202 nm) の約 13. 50 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0285】

図119は、この8層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この8層反射膜は、所定反射率の8. 0% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 647 nm から 819 nm にわたって反射率は 7. 1% から 9. 0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 808 nm の反射率 8. 0% を基準として、-1. 5% から +1. 0% の範囲、即ち、6. 5% ~ 9. 0% の範囲の連続した波長帯域幅は 172 nm である。この波長帯域幅を設定波長 808 nm で割った値は約 0. 213 であり、仮想单層反射膜の場合の 0. 065 より大きい。そこで、この8層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0286】

実施の形態108.

本発明の実施の形態108に係る8層反射膜を備えた半導体光素子について、図120を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態107に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 891$ nm で設定反射率 $R(\lambda)$ を 8. 0% としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0. 707082$ 、 $\phi_2 = 0. 56214$ とすることによって波長 891 nm で反射率 8. 0% とすることができます。この場合、8層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3 / A d_2 / B d_1 / B d_2 / C d_1 / C d_2 / D d_1 / D d_2 = 5\text{ nm} / 9. 75\text{ nm} / 96. 79\text{ nm} / 9$

7.45 nm/125.82 nm/126.69 nm/96.79 nm/97.45 nmである。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 655.74 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i の積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、3016.09 nm であり、所定波長 808 nm の 1/4 波長 (= 202 nm) の約 14.93 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0287】

図120は、この8層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この8層反射膜は、所定反射率の 8.0% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 712 nm から 903 nm にわたって反射率は 7.0% から 9.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 891 nm の設定反射率 8.0% を基準として、-1.5% から +1.0% の範囲、即ち、6.5% ~ 9.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 191 nm である。この波長帯域幅を設定波長 891 nm で割った値は約 0.214 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この8層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0288】

実施の形態 109.

本発明の実施の形態 109 に係る 8 層反射膜を備えた半導体光素子について、図121 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 105 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 808 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 12.0% としている点で相違する。また、パラメータは $A = 0.10$ 、 $B = 2.53$ 、 $C = 2.75$ 、 $D = 2.00$ としている。さらに、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.549712$ 、 $\phi_2 = 0.58774$ とすることによって波長 808 nm で反射率 12.0% とすることができます。この場合、8層反射膜のそれぞれの膜厚は、 $d_3 / Ad_2 / Bd_1 / Bd_2 / Cd_1 / Cd_2 / Dd_1 / Dd_2 = 5 \text{ nm} / 4.62 \text{ nm} / 86.32 \text{ nm} / 116.88 \text{ nm} / 93.82 \text{ nm} / 127.05 \text{ nm} / 68.24 \text{ nm} / 92.40 \text{ nm}$ である。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 594.33 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i の積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、2352.26 nm であり、所定波長 808 nm の 1/4 波長 (= 202 nm) の約 11.64 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0289】

図121は、この8層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この8層反射膜は、所定反射率の 12.0% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 617 nm から 821 nm にわたって反射率は 10.6% から 13.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 808 nm の反射率 12.0% を基準として、-1.5% から +1.0% の範囲、即ち、10.5% ~ 13.0% の範囲の連続した波長帯域幅は 204 nm である。この波長帯域幅を設定波長 808 nm で割った値は約 0.252 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この8層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0290】

実施の形態 110.

本発明の実施の形態 110 に係る 8 層反射膜を備えた半導体光素子について、図122 を用いて説明する。この半導体光素子は、実施の形態 109 に係る半導体光素子と比較すると、設定波長 $\lambda = 909 \text{ nm}$ で設定反射率 $R(\lambda)$ を 12.0% として、パラメータ $B = 2.57$ としている点で相違する。また、酸化タンタル及びアルミナのそれぞれの位相変化 ϕ_1 及び ϕ_2 を、 $\phi_1 = 0.53932$ 、 $\phi_2 = 0.592482$ とすることによって波長 909 nm で反射率 12.0% とすることができます。この場合、8層反射膜のそれぞれの膜厚は $d_3 / Ad_2 / Bd_1 / Bd_2 / Cd_1 / Cd_2 / Dd_1 / Dd_2 = 5 \text{ nm}$

／5. 24 nm／96. 78 nm／134. 65 nm／103. 56 nm／144. 08 nm／75. 31 nm／104. 79 nmである。全体の膜厚 ($d_{total} = \sum d_i$) は 669. 41 nm である。また、それぞれの膜の屈折率 n_i と膜厚 d_i との積 $n_i d_i$ の総和 $\sum n_i d_i$ は、2618. 82 nm であり、所定波長 808 nm の $1/4$ 波長 (= 202 nm) の約 12. 96 倍と非常に厚い。このため、端面における放熱特性が良くなり、端面温度の上昇を抑制できる。

【0291】

図122は、この8層反射膜の反射率の波長依存性を示すグラフである。グラフの横軸は波長であり、縦軸は反射率である。この8層反射膜は、所定反射率の 12.0% 前後の平坦部分が広い波長帯域にわたって得られている。即ち、波長 693 nm から 923 nm にわたって反射率は 10.5% から 13.0% の範囲内に収まっている。また、設定波長 909 nm の設定反射率 12.0% を基準として、 -1.5% から $+1.0\%$ の範囲、即ち、 $10.5\% \sim 13.0\%$ の範囲の連続した波長帯域幅は 230 nm である。この波長帯域幅を設定波長 909 nm で割った値は約 0.253 であり、仮想单層反射膜の場合の 0.065 より大きい。そこで、この8層反射膜は、反射率が広い波長帯域にわたる平坦部を有していることがわかる。

【0292】

以下に、実施の形態85から実施の形態98に係る半導体光素子の多層反射膜の特性について、表10に示した。表10には、多層反射膜の特性として、多層反射膜の構成、設定波長 λ 及び設定反射率 $R(\lambda)$ 、極小反射率、 $\sum n_i d_i$ 及び所定波長 808 nm の $1/4$ 波長 (202 nm) との対比、 $R(\lambda)$ の $-1.5 \sim +1.0\%$ の範囲となる波長帯域幅 $\Delta\lambda$ 、 $\Delta\lambda/\lambda$ について示した。

【0293】

【表10】

表10

実施の形態	多層反射膜の特性						
	多層反射膜の構成	設定波長λ	設定反射率R(λ)	極小反射率	$\sum n_i d_i$ 、波長808nmの1/4波長(202nm)との対比	R(λ)の-1.5~1.0%となる波長帯域△λ	△λ/λ
99	8層膜	808nm 4%	2.6%	2108.54nm 10.44倍	139nm	139/808=0.172	
100	8層膜	744nm 4%	2.5%	1949.67nm 9.65倍	131nm	131/744=0.101	
101	8層膜	808nm 8%	6.6%	2177.34nm 10.78倍	145nm	145/808=0.179	
102	8層膜	753nm 8%	6.7%	2024.36nm 10.02倍	124nm	124/753=0.165	
103	8層膜	808nm 12%	10.7%	2264.47nm 11.21倍	236nm	236/808=0.292	
104	8層膜	706nm 12%	10.9%	2005.83nm 9.93倍	201nm	201/706=0.285	
105	8層膜	808nm 4%	2.7%	2355.68nm 11.66倍	232nm	232/808=0.287	
106	8層膜	716nm 4%	3.0%	2115.46nm 10.47倍	197nm	197/716=0.275	
107	8層膜	808nm 8%	7.1%	2726.92nm 13.50倍	172nm	172/808=0.213	
108	8層膜	891nm 8%	7.0%	3016.09nm 14.93倍	191nm	191/891=0.214	
109	8層膜	808nm 12%	10.6%	2352.26nm 11.64倍	204nm	204/808=0.252	
110	9層膜	909nm 10%	10.5%	2618.82nm 12.96倍	230nm	230/909=0.253	

【0294】

以上、本発明を説明する実施の形態において、7層反射膜、6層反射膜、9層反射膜及び8層反射膜をその一例として挙げて説明したが、本発明はこれらに限定されるものではない。多層反射膜はこれ以外の複数層であってもよい。3種類の材料を用いる場合を示したが、4種類以上の材料の場合も予め位相条件を与えることで同様に取り扱える。なお、3種類の材料の一例として窒化アルミニウム(A1N)を厚さ50nm、とした例、アルミナ(A1₂O₃)を10nm、あるいは石英(SiO₂)を5nm設けた場合をそれぞれ示したが材料及び膜厚はこれに限るものではない。また、一対のアルミナ及び酸化タンタルの2層膜、酸化タンタル及び石英の2層膜等の寄与を示すO, A, B, C, D等のパラメータの値は上記実施の形態に示した値に限定されるものではない。さらに、半導体光素子として半導体レーザ素子の場合を例に挙げたが、これに限られず、本発明は半導体光増幅器、スーパーパルミネセント・ダイオード、光変調器、光スイッチ等の光デバイスにも適用することができる。また、波長として980nm近傍及び808nm近傍に限定されるものではなく、可視光領域、遠赤外領域、赤外領域においても適用できる。さらに、反射率として約2~12%の反射率の場合について説明したがその他の反射率でも適用できる。

【図面の簡単な説明】

【0295】

【図1】複素数表示による振幅反射率を示す複素平面図である。

【図2】端面に仮想单層反射膜を有する半導体光素子の構造を示す概略断面図である。

【図3】図2の仮想单層反射膜を2層膜で置き換えた場合の本発明に係る半導体光素子の構造を示す概略断面図である。

【図4】図2の仮想单層反射膜を4層膜で置き換えた場合の本発明に係る半導体光素子の構造を示す概略断面図である。

【図5】本発明の実施の形態1に係る半導体光素子の端面部の構造を示す概略断面図である。

【図6】本発明の実施の形態1に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図7】本発明の実施の形態2に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図8】端面部に形成された仮想单層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図9】本発明の実施の形態3に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図10】本発明の実施の形態4に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図11】本発明の実施の形態5に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図12】本発明の実施の形態6に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図13】本発明の実施の形態7に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図14】本発明の実施の形態8に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図15】本発明の実施の形態9に係る半導体光素子の端面部の構造を示す概略断面図である。

【図16】本発明の実施の形態9に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図17】本発明の実施の形態10に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図18】本発明の実施の形態11に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図19】本発明の実施の形態12に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図20】本発明の実施の形態13に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図21】本発明の実施の形態14に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図22】本発明の実施の形態15に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図23】本発明の実施の形態16に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図24】本発明の実施の形態17に係る半導体光素子の端面部の構造を示す概略断面図である。

【図25】本発明の実施の形態17に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図101】本発明の実施の形態91に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図102】本発明の実施の形態92に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図103】本発明の実施の形態93に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図104】本発明の実施の形態94に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図105】本発明の実施の形態95に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図106】本発明の実施の形態96に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図107】本発明の実施の形態97に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図108】本発明の実施の形態98に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図109】本発明の実施の形態99に係る半導体光素子の端面部の構造を示す概略断面図である。

【図110】本発明の実施の形態99に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図111】本発明の実施の形態100に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図112】本発明の実施の形態101に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図113】本発明の実施の形態102に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図114】本発明の実施の形態103に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図115】本発明の実施の形態104に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図116】本発明の実施の形態105に係る半導体光素子の端面部の構造を示す概略断面図である。

【図117】本発明の実施の形態105に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図118】本発明の実施の形態106に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図119】本発明の実施の形態107に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図120】本発明の実施の形態108に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図121】本発明の実施の形態109に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図122】本発明の実施の形態110に係る半導体光素子の端面部に形成された多層反射膜における反射率の波長依存性を示すグラフである。

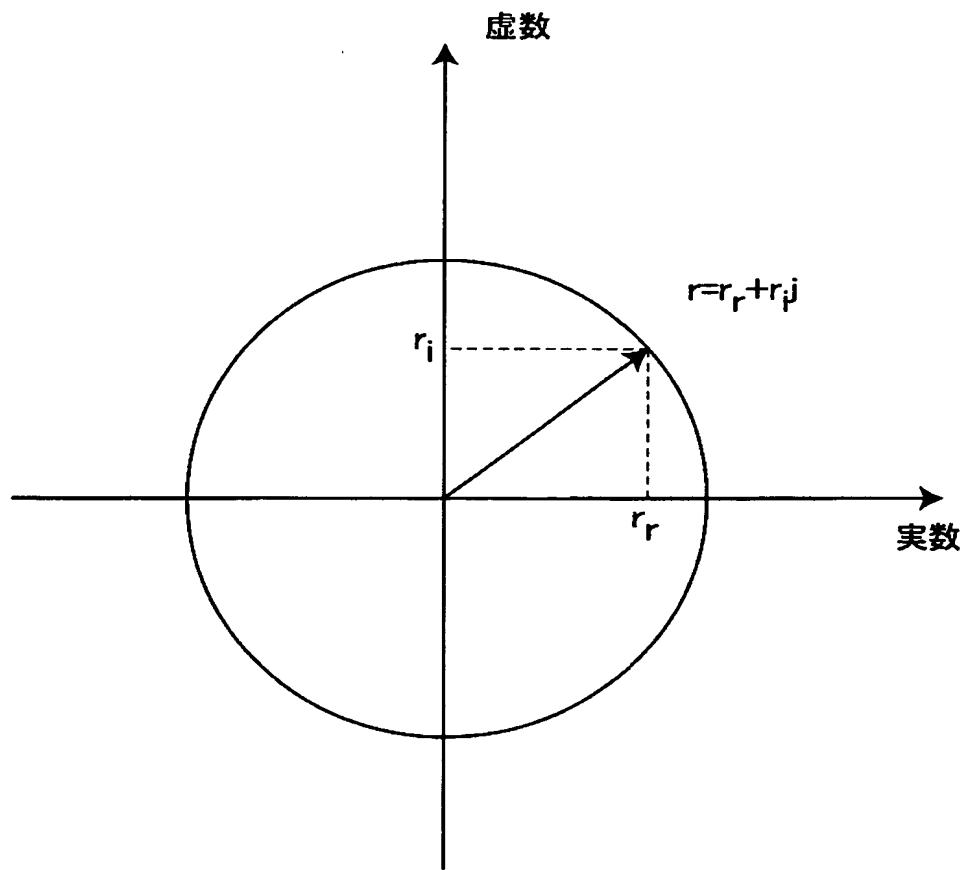
【符号の説明】

【0296】

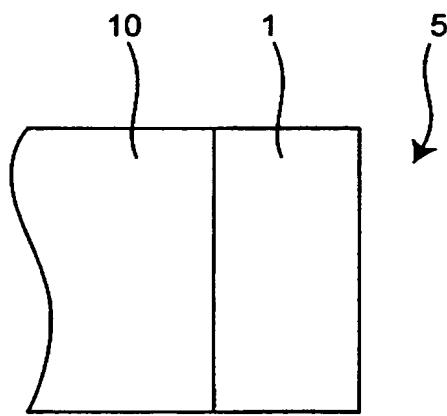
1	第1層膜、2	第2層膜、3	第3層膜、4	第4層膜、5	自由空間（空気）、1
0	導波層、11、21、31、41、51	第1層膜、12、22、32、42、52			
	第2層膜、13、23、33、43、53	第3層膜、14、24、34、44、54			
	第4層膜、15、25、35、45、55	第5層膜、16、26、36、46、56			

第6層膜、17、27、47、57 第7層膜、20、7層反射膜（第1層膜：アルミナ）、30 7層反射膜（第1層膜：酸化タンタル）、40 6層反射膜、50 7層反射膜（窒化アルミニウム膜を含む）、58 第8層膜、59 第9層膜、60 9層反射膜、70、80 8層反射膜、71、81 第1層膜、72、82 第2層膜、73、83 第3層膜、74、84 第4層膜、75、85 第5層膜、76、86 第6層膜、77、87 第7層膜、78、88 第8層膜、100 導波層、101 反射膜、103 単層反射膜（膜厚 $d = \lambda / (4 n_1)$ ）、104 単層反射膜（膜厚 $d = 5 \lambda / (4 n_1)$ ）

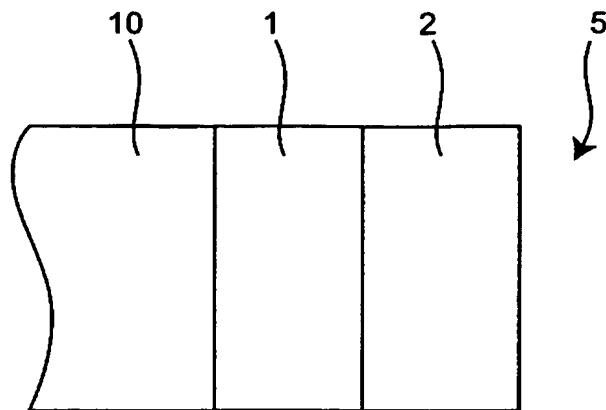
【書類名】図面
【図 1】



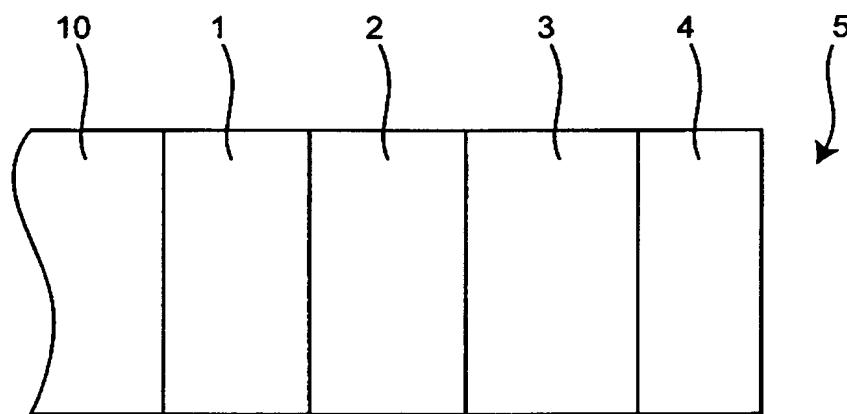
【図 2】



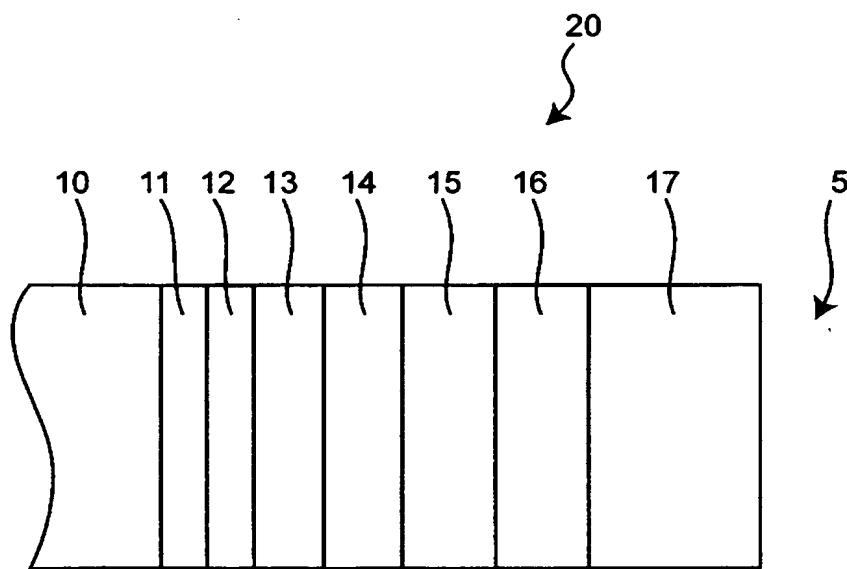
【図3】



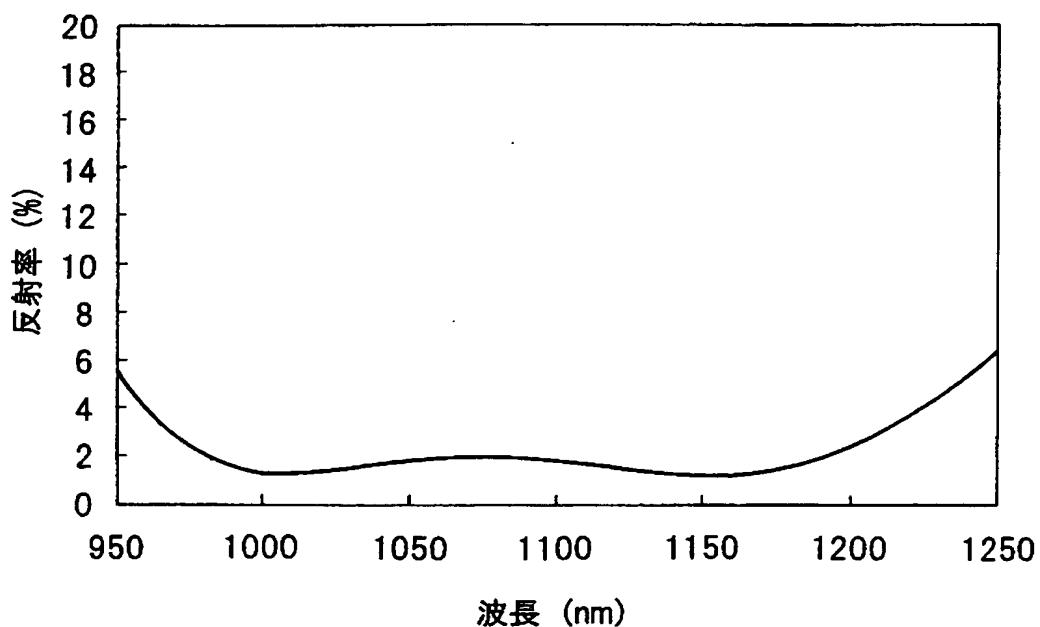
【図4】



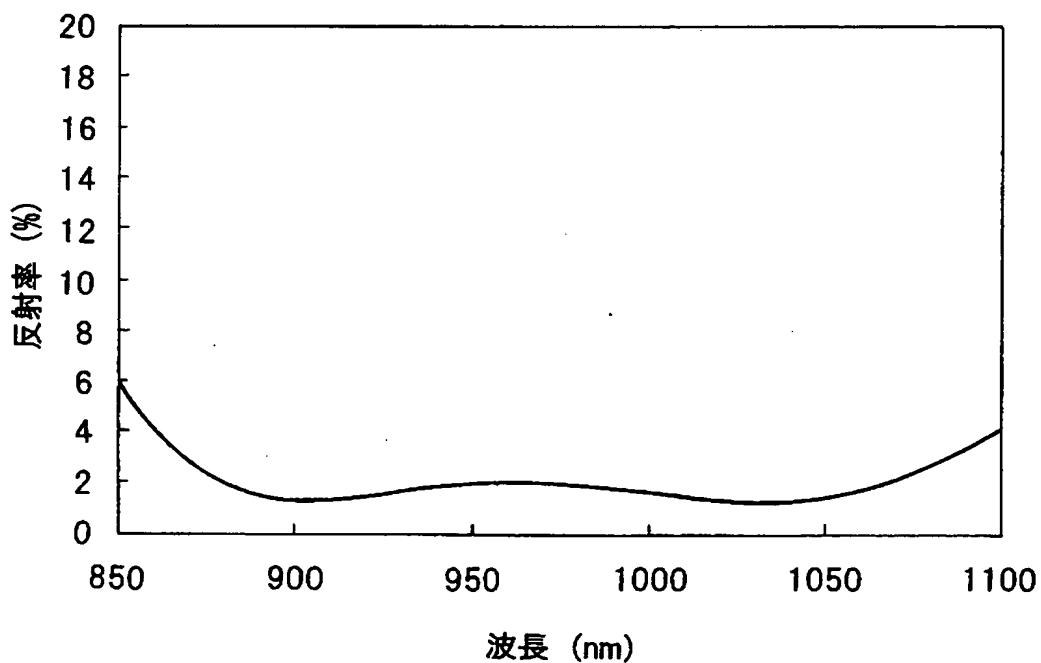
【図5】



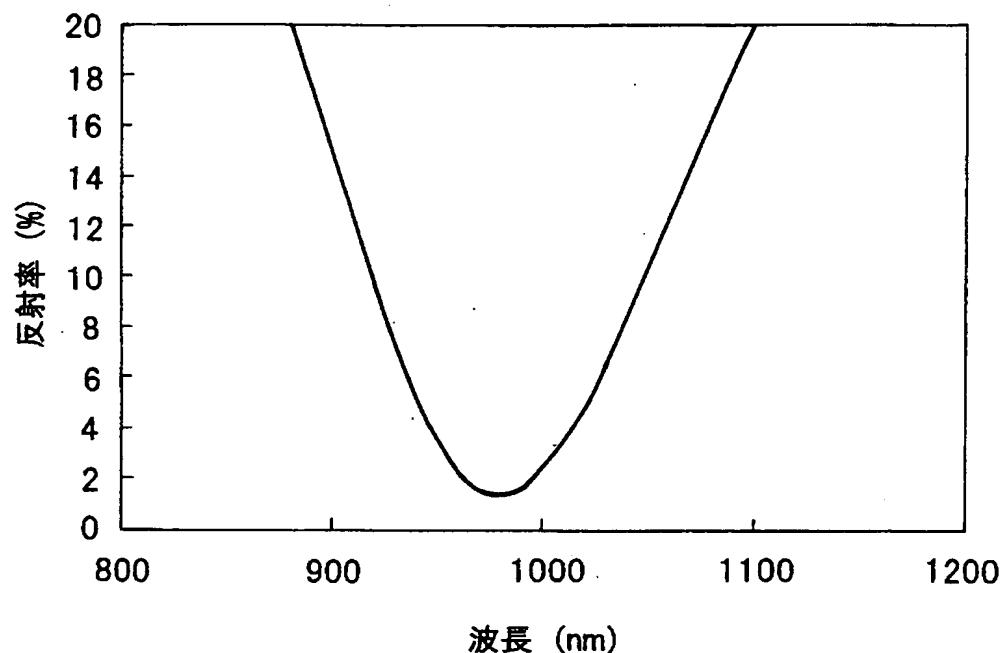
【図6】



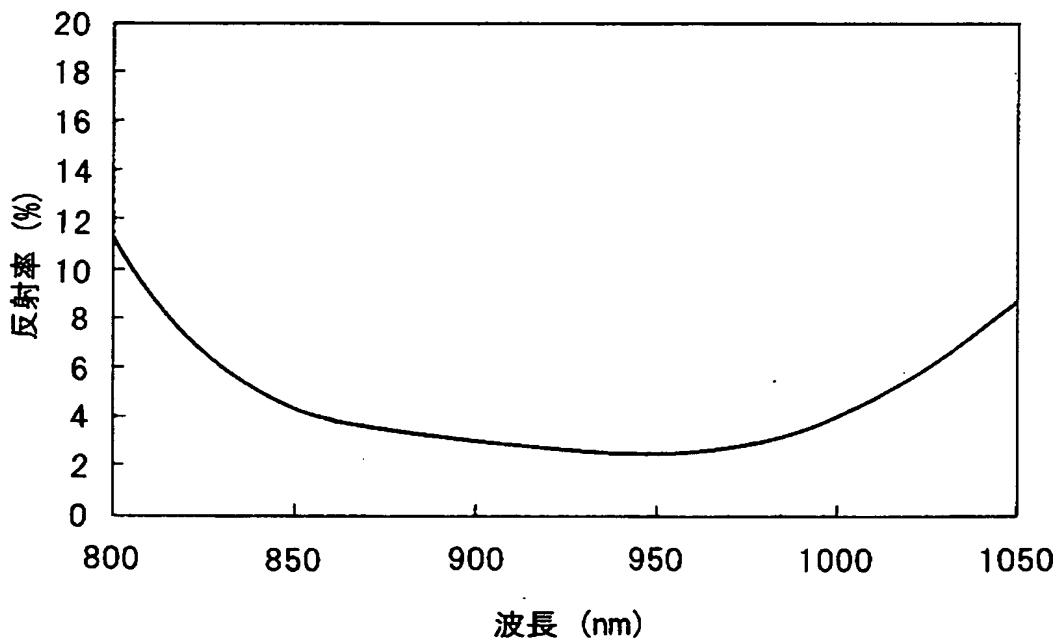
【図7】



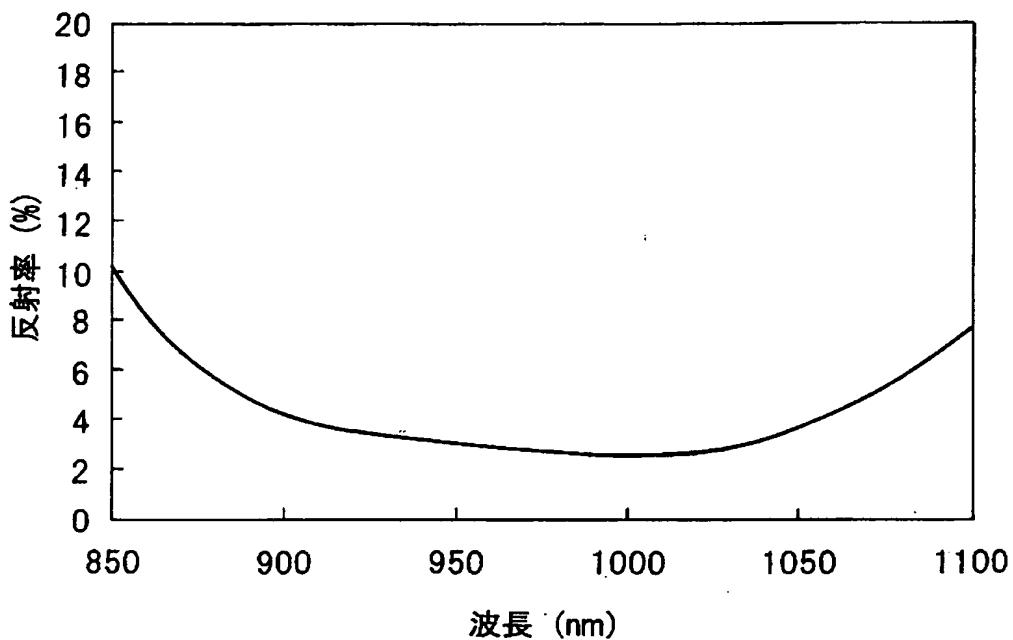
【図8】



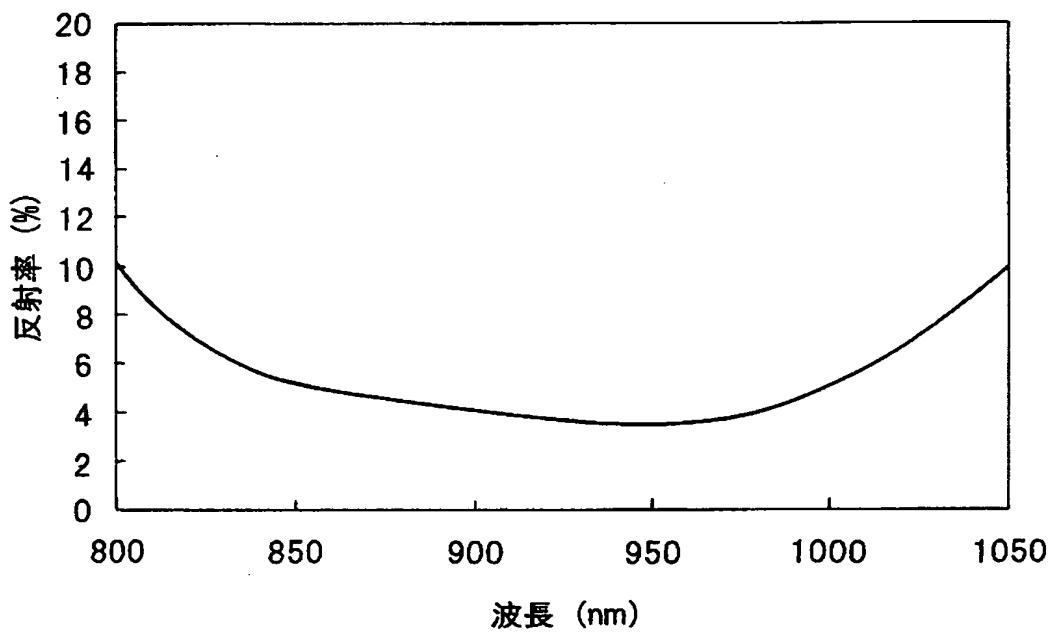
【図9】



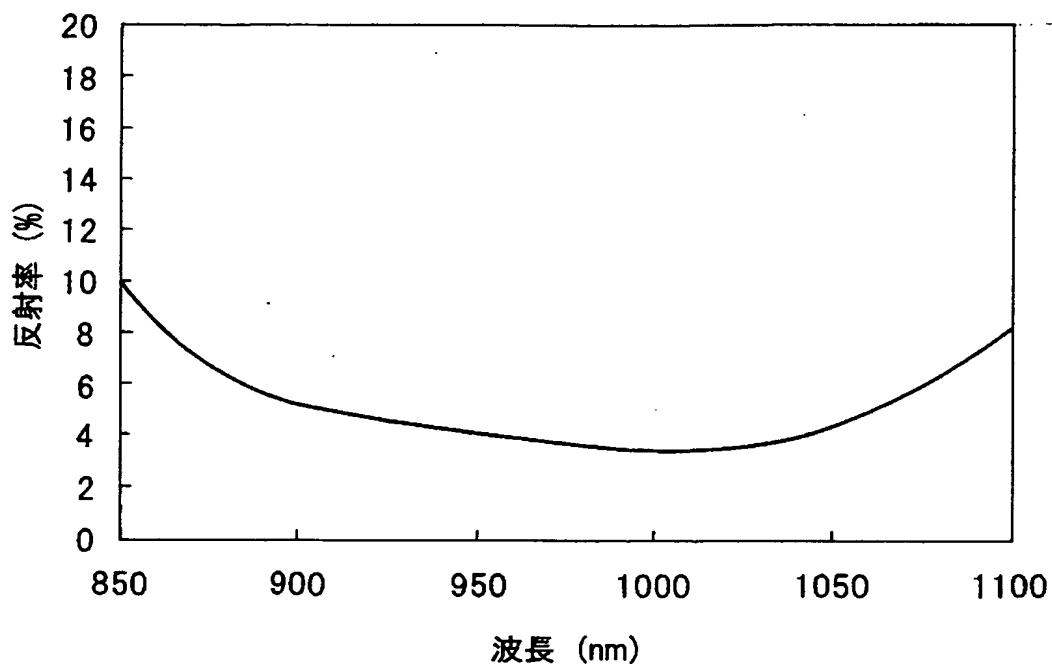
【図10】



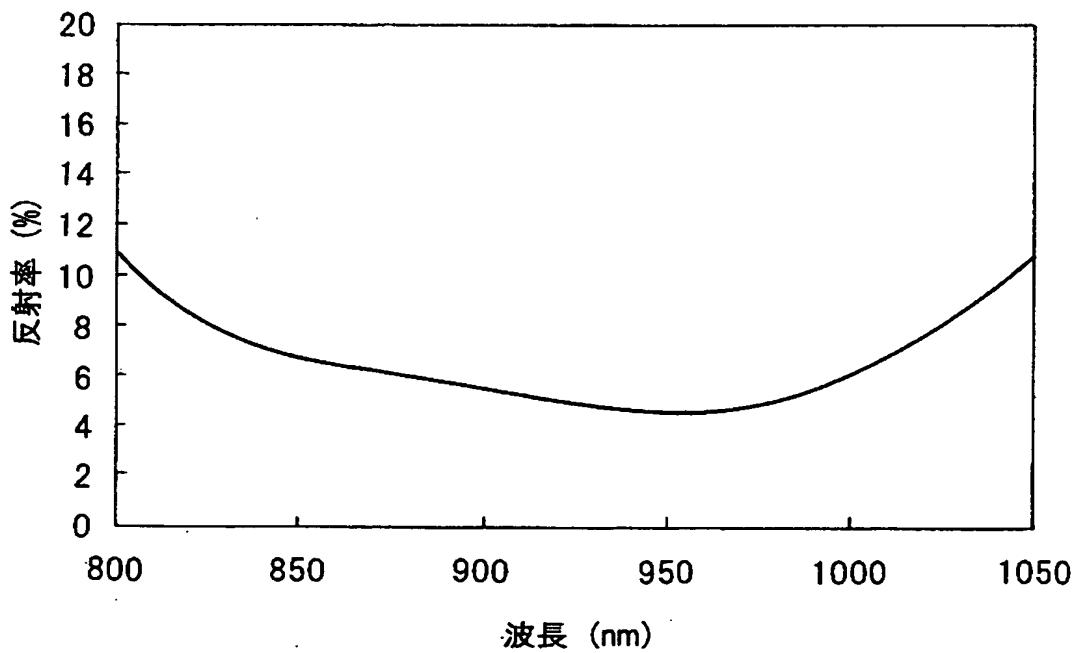
【図11】



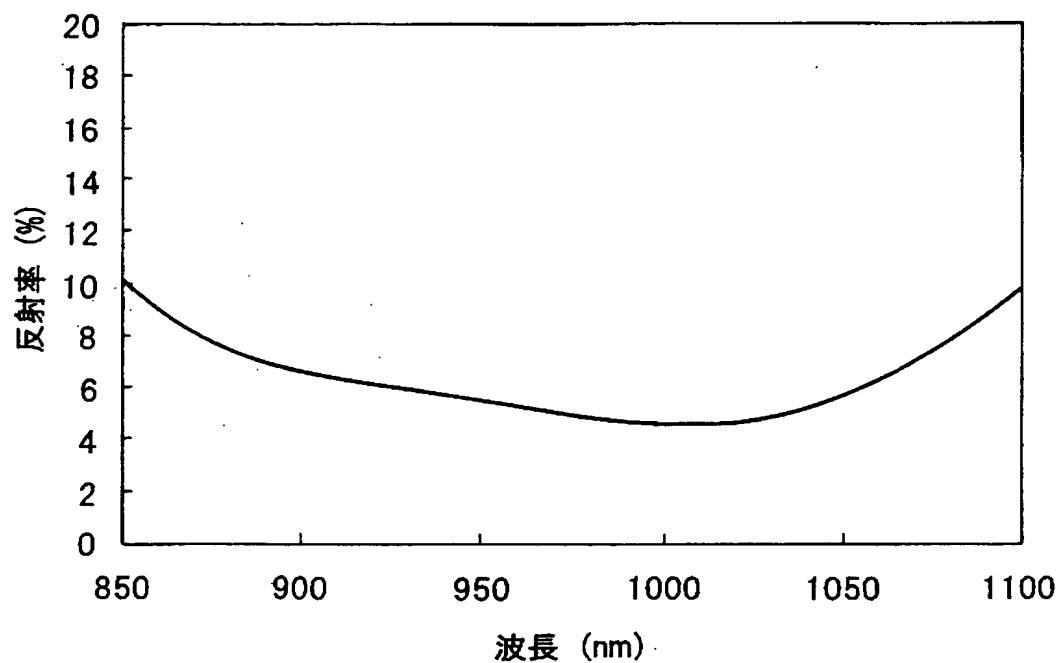
【図12】



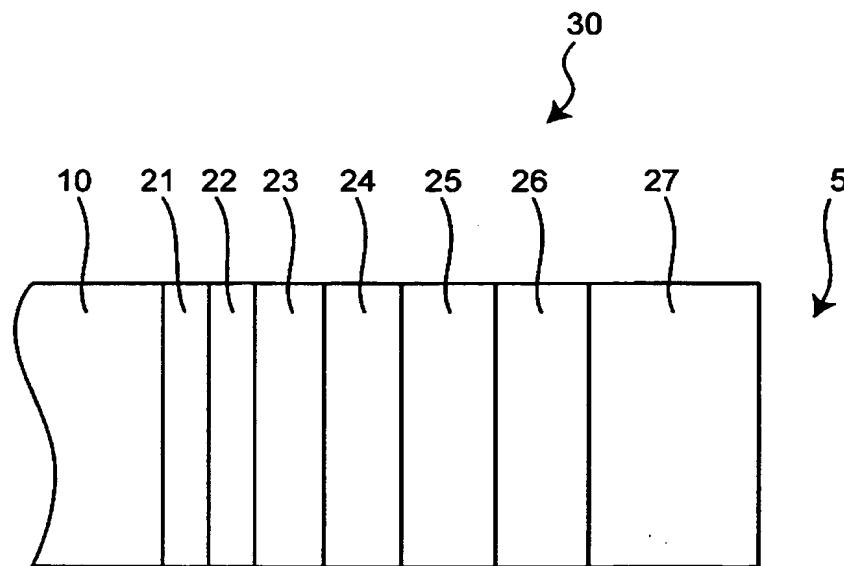
【図13】



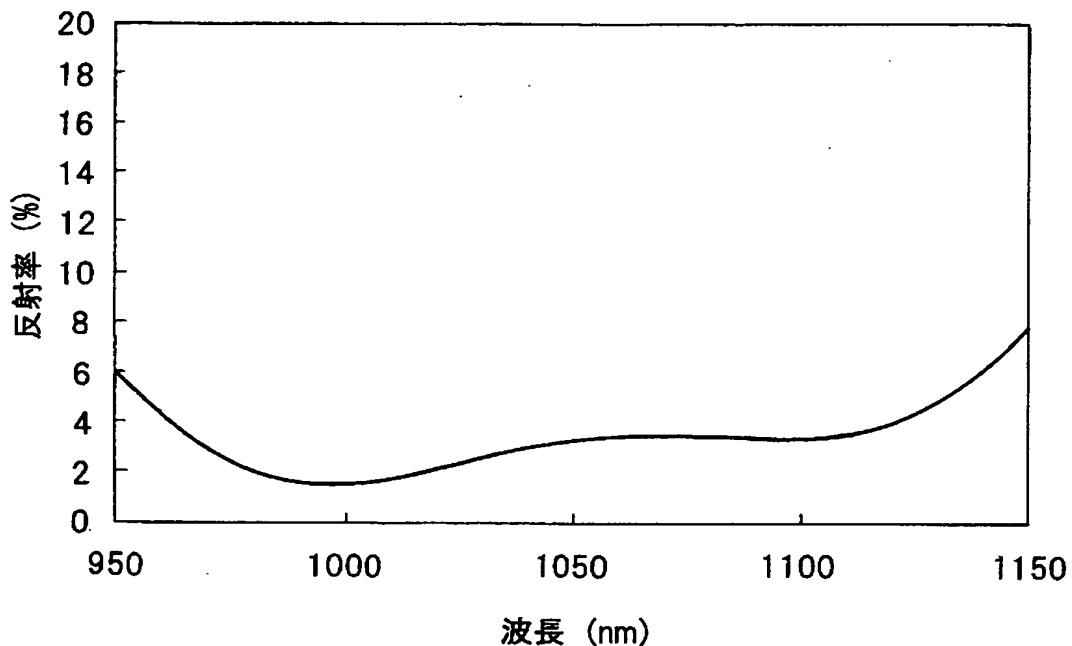
【図 14】



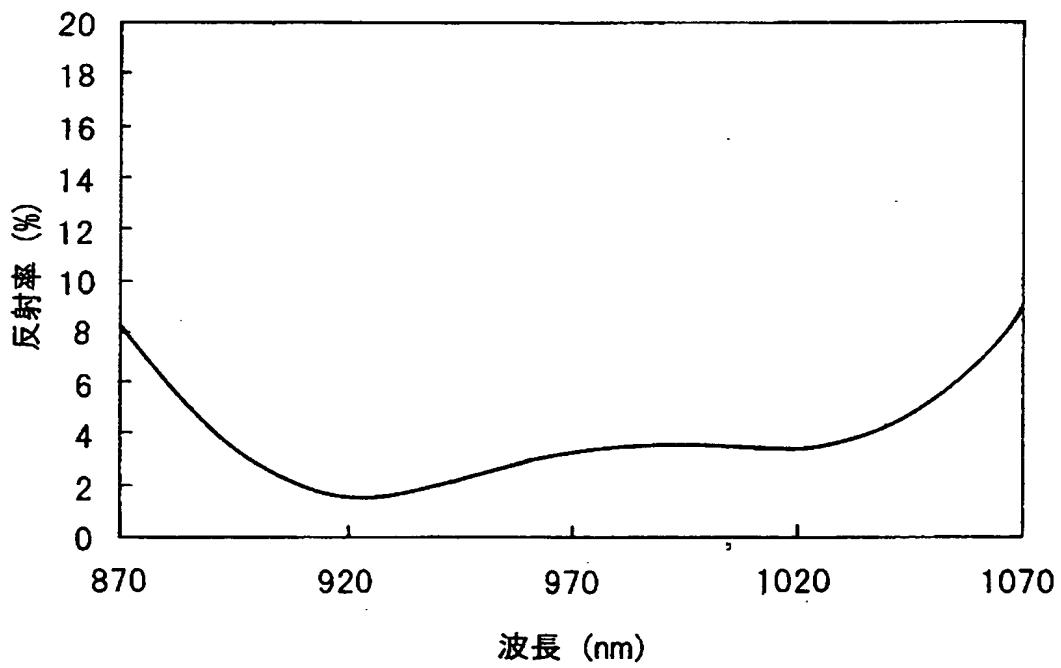
【図 15】



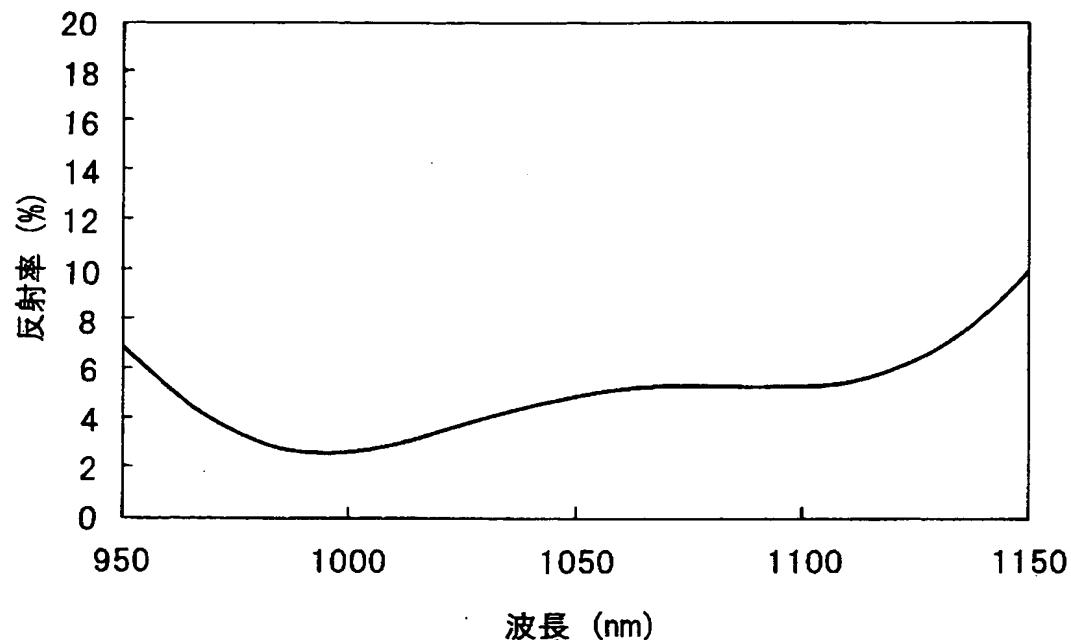
【図16】



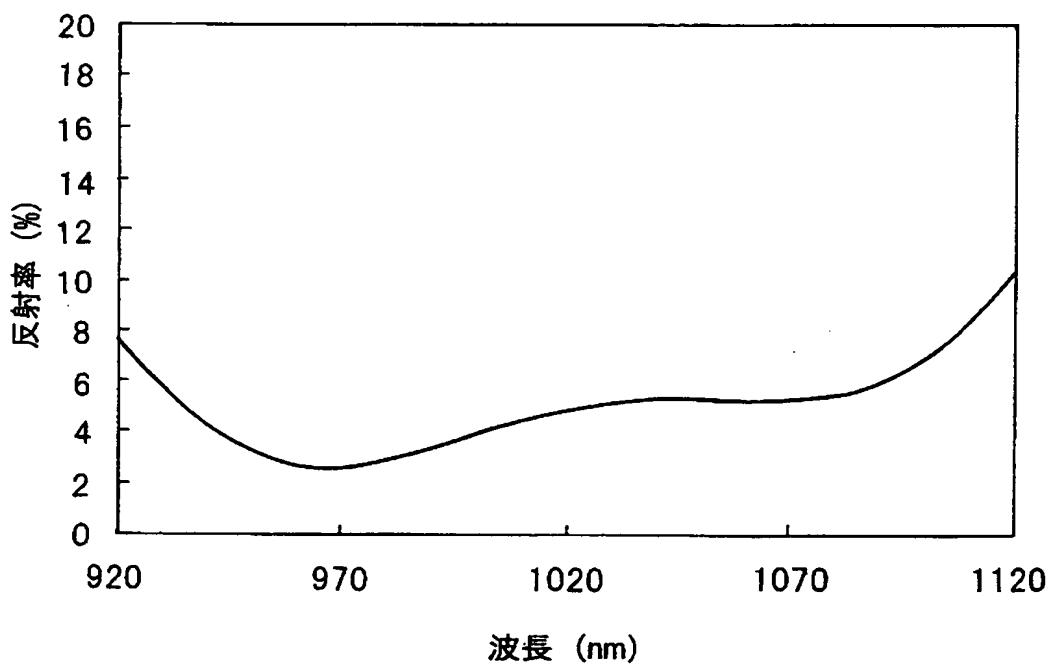
【図17】



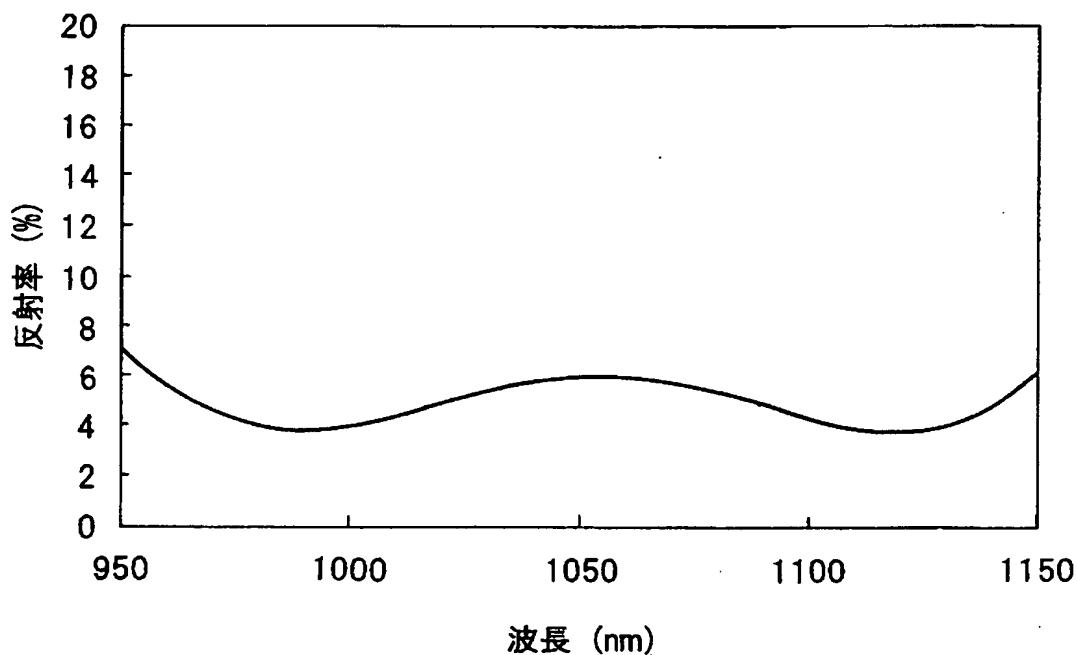
【図18】



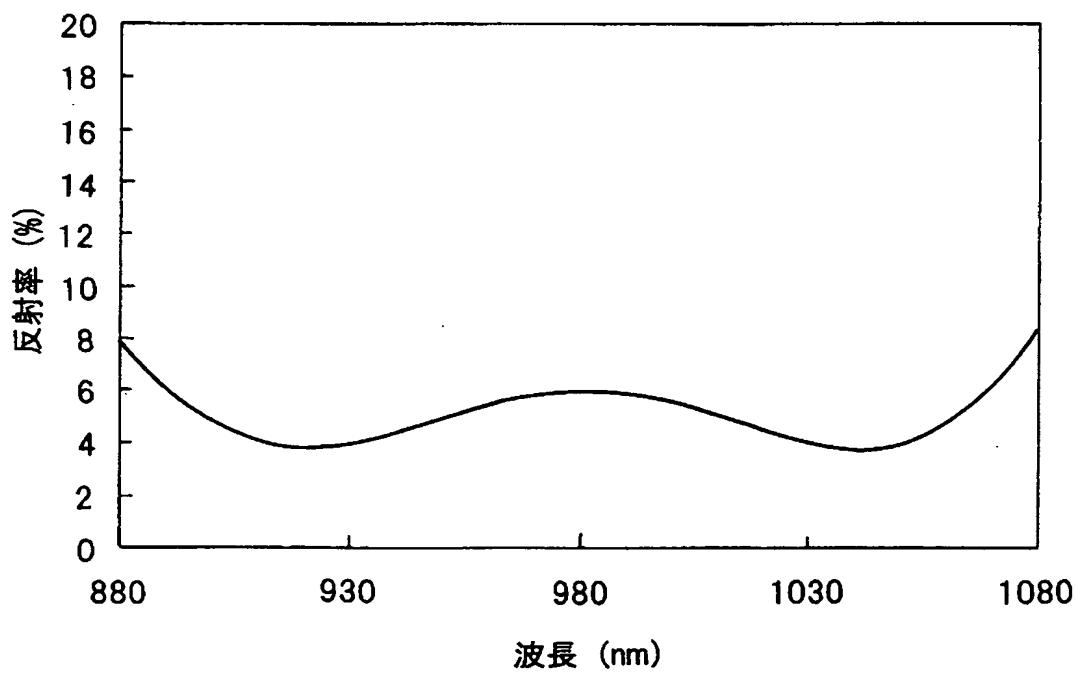
【図19】



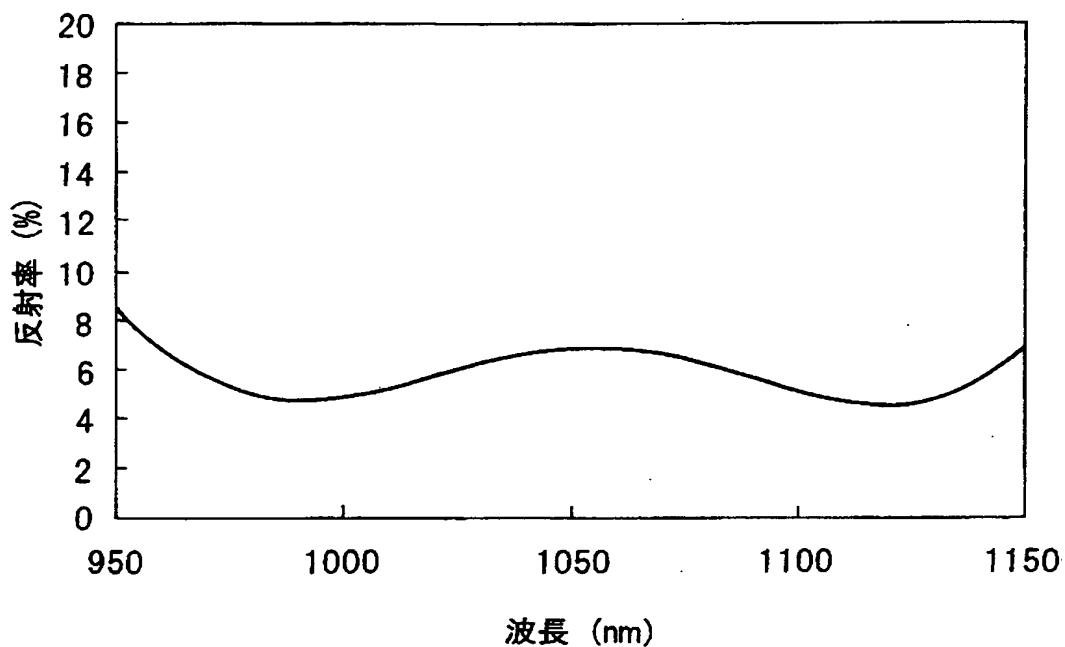
【図20】



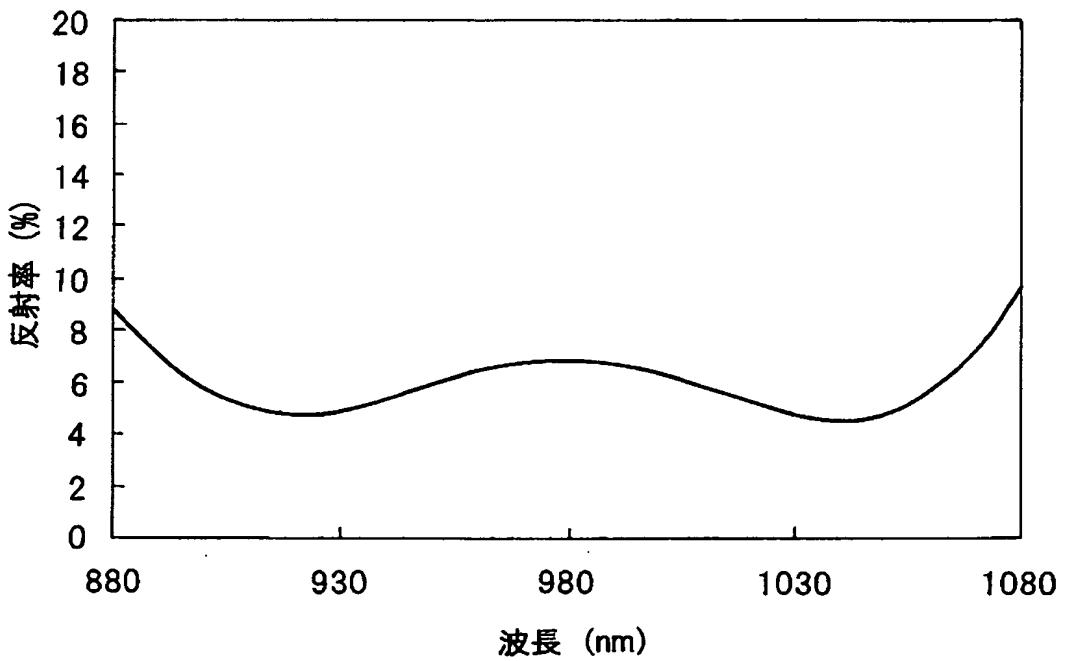
【図21】



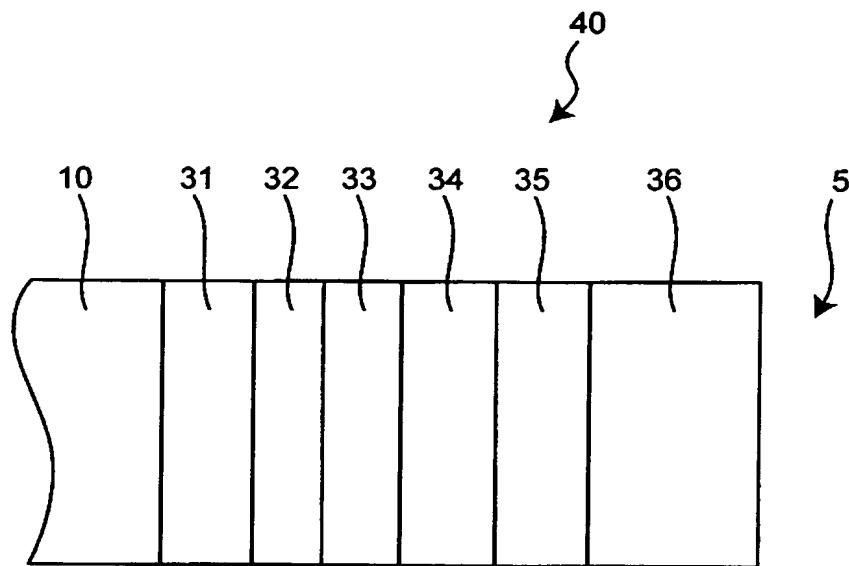
【図22】



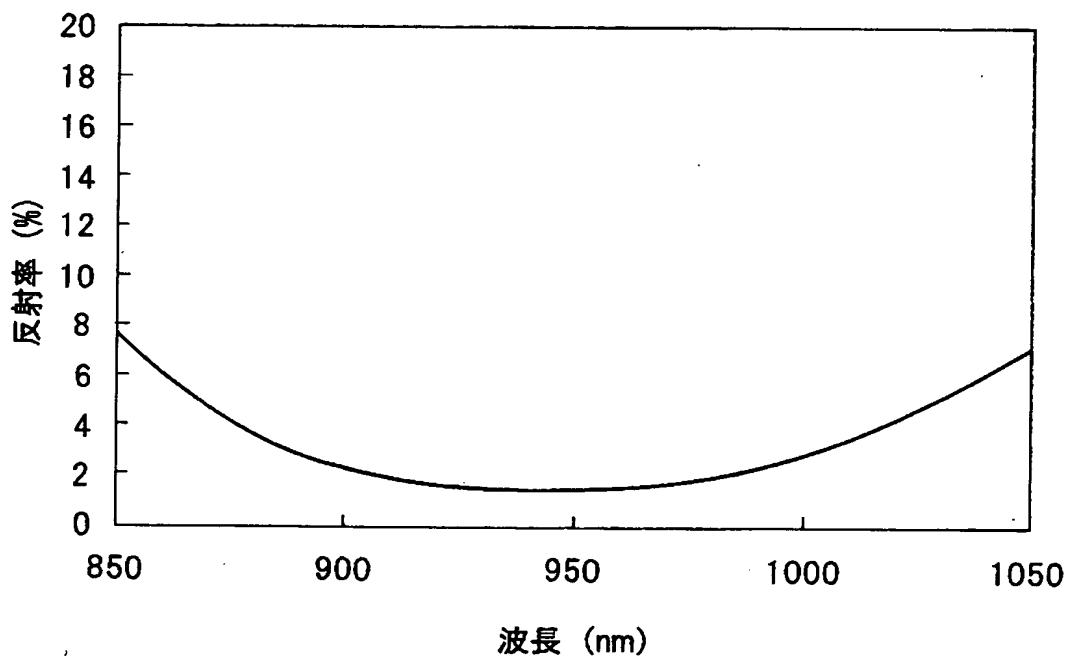
【図23】



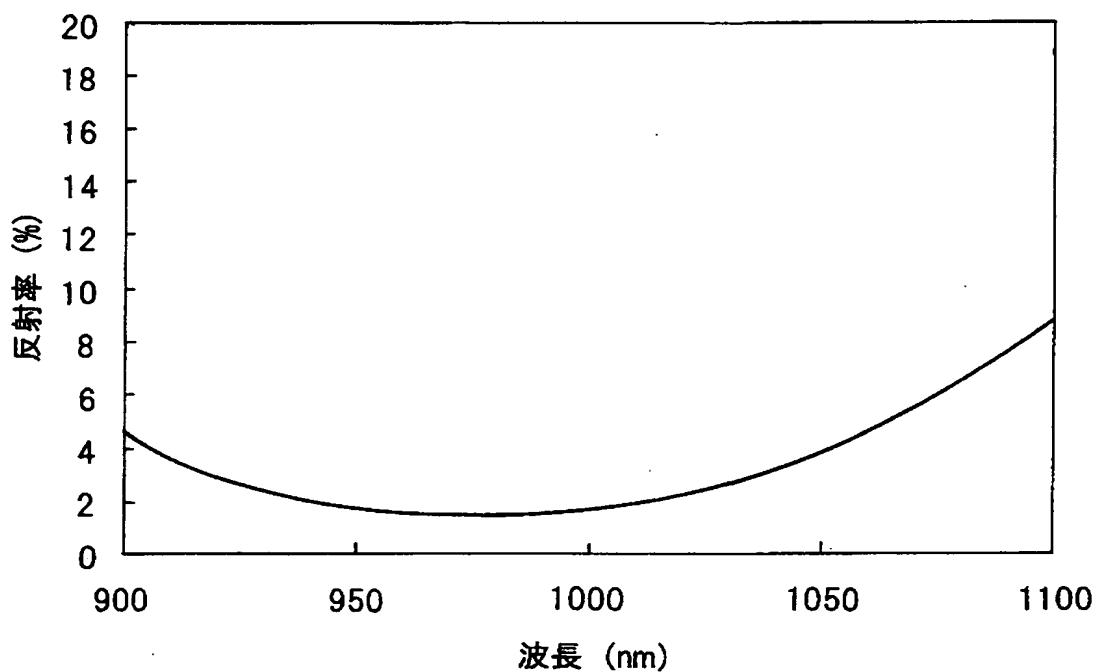
【図24】



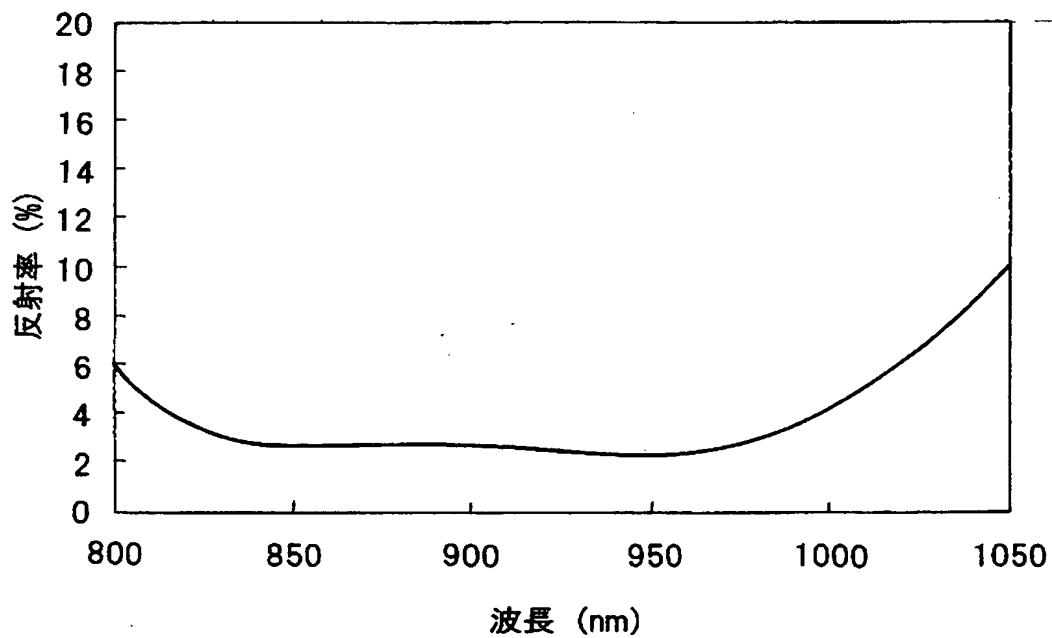
【図25】



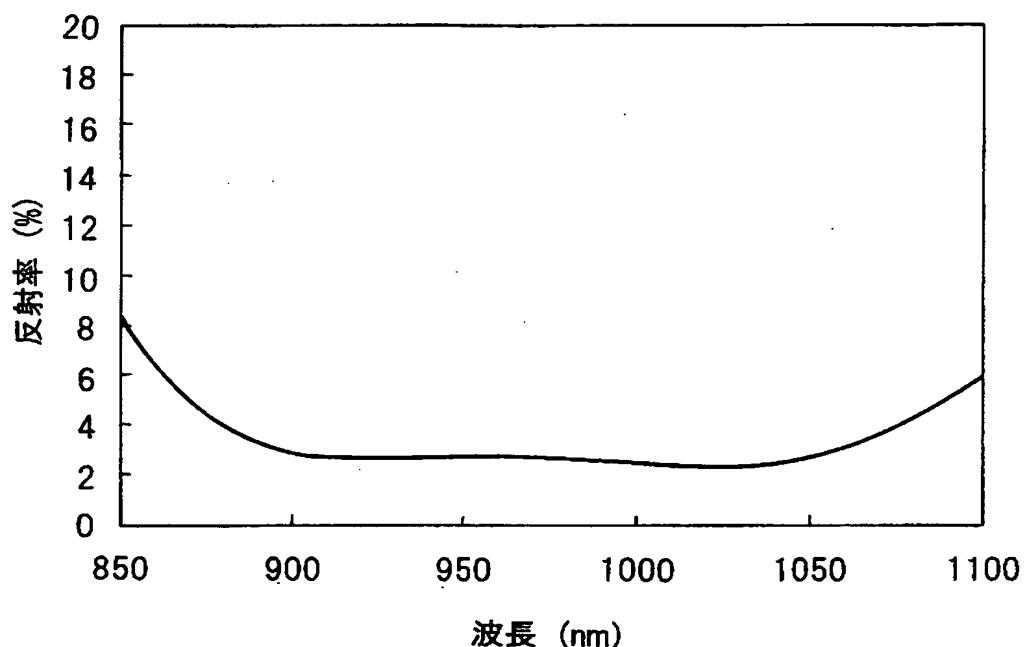
【図26】



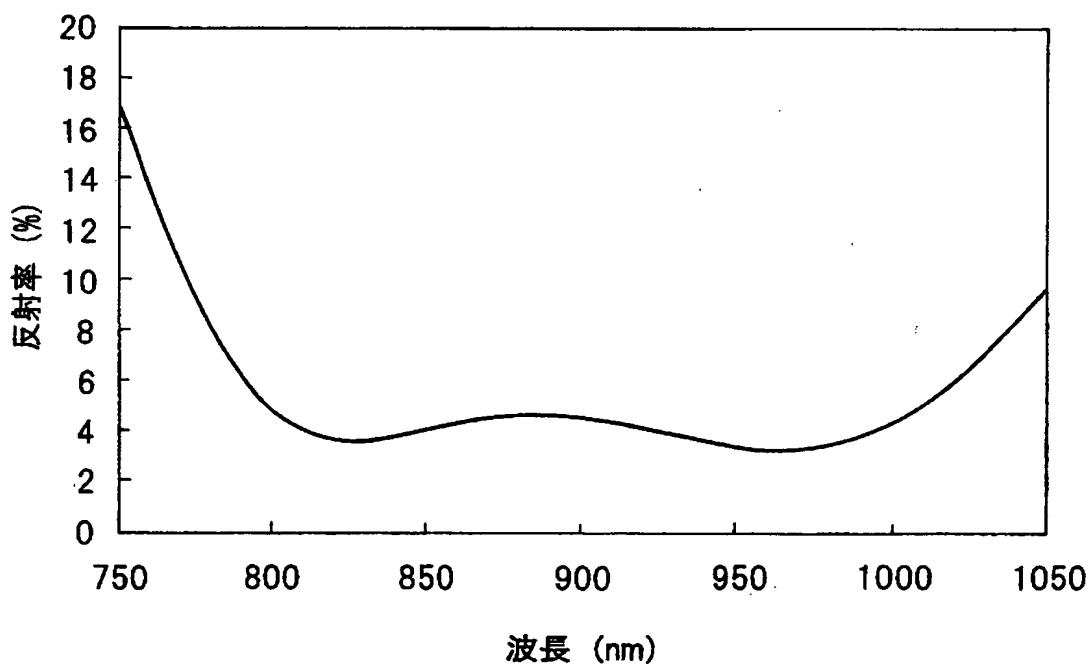
【図27】



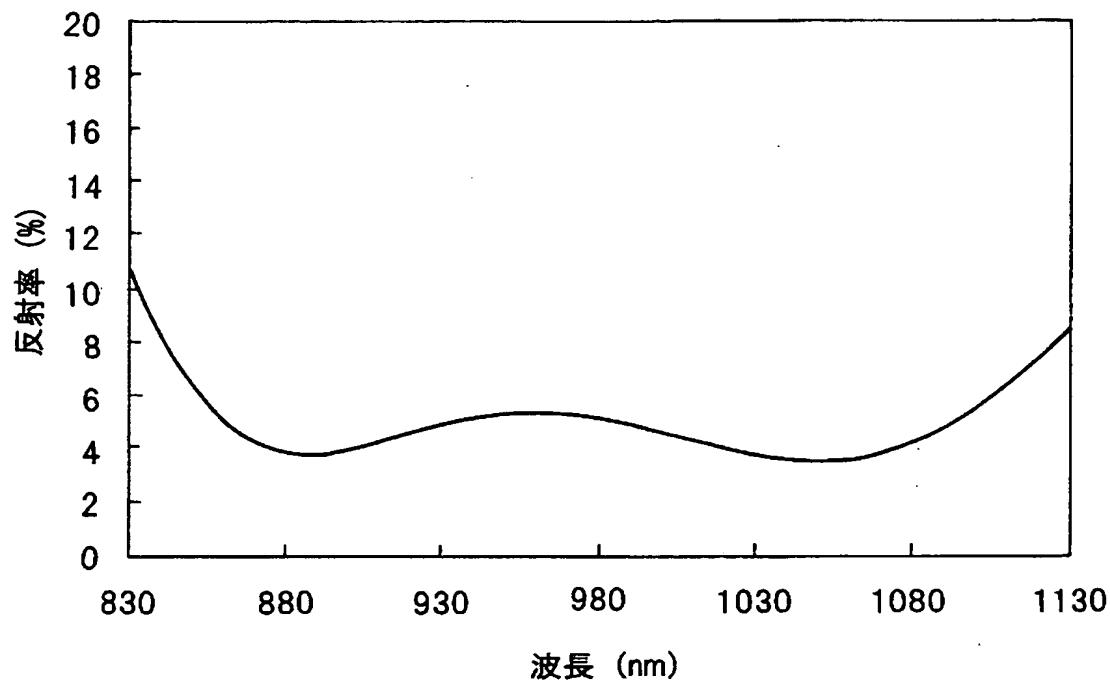
【図28】



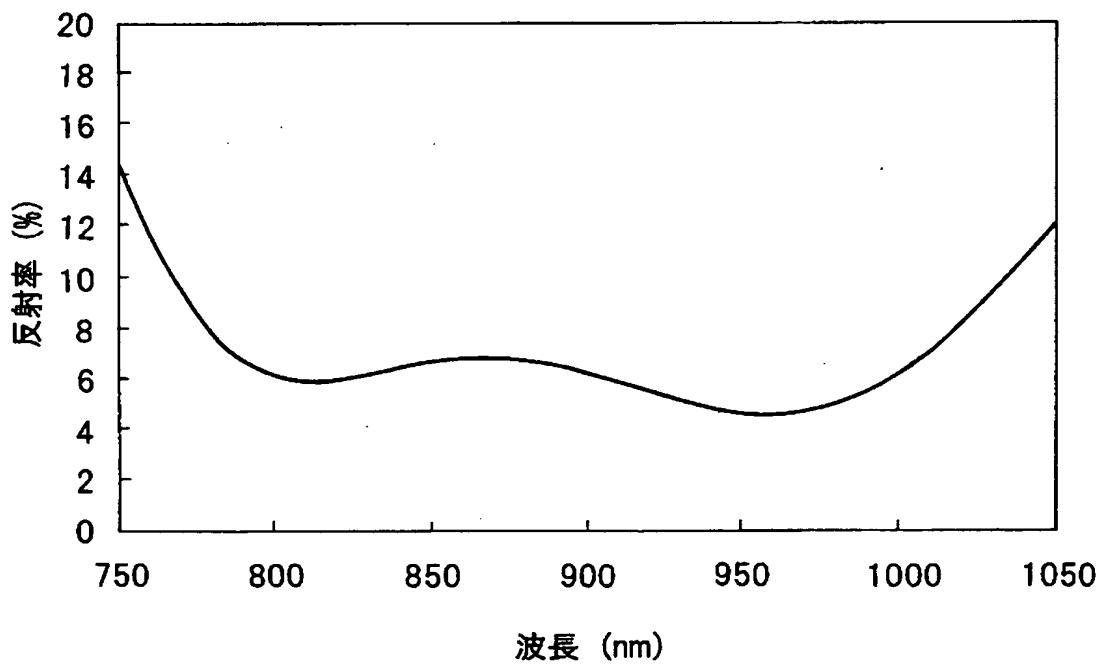
【図29】



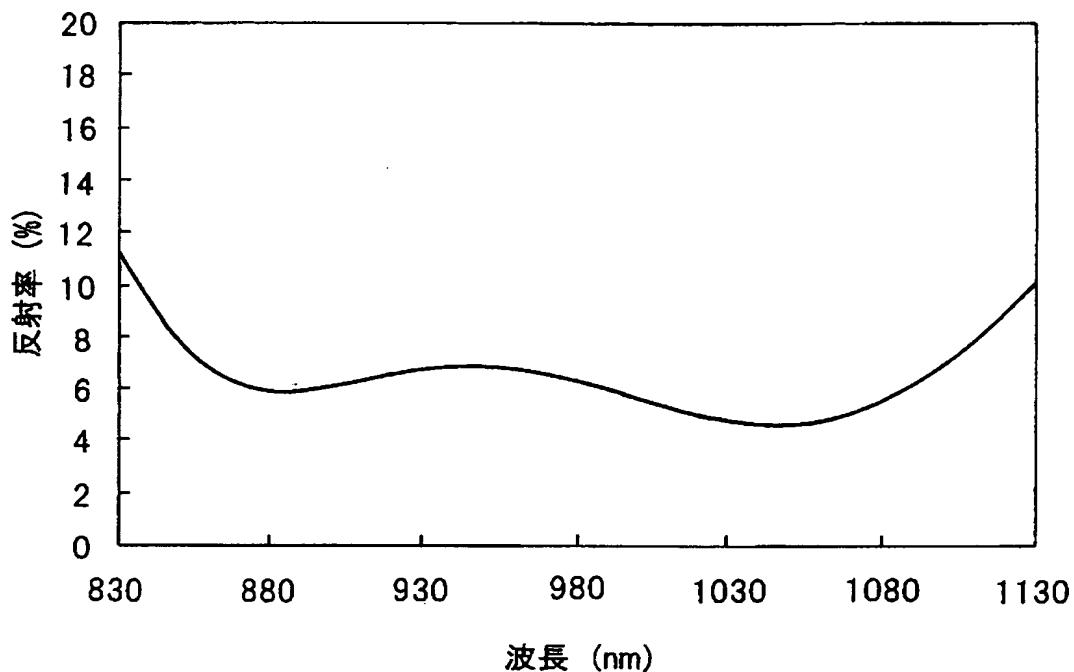
【図30】



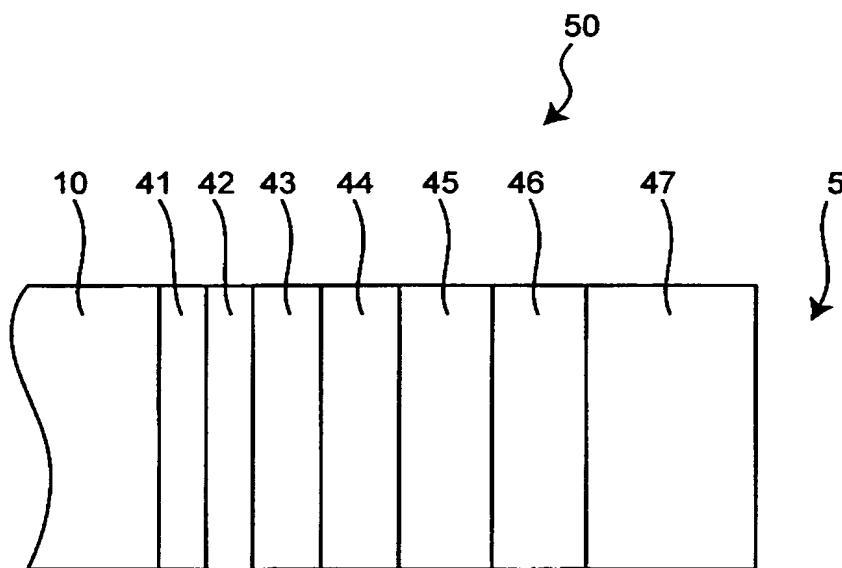
【図31】



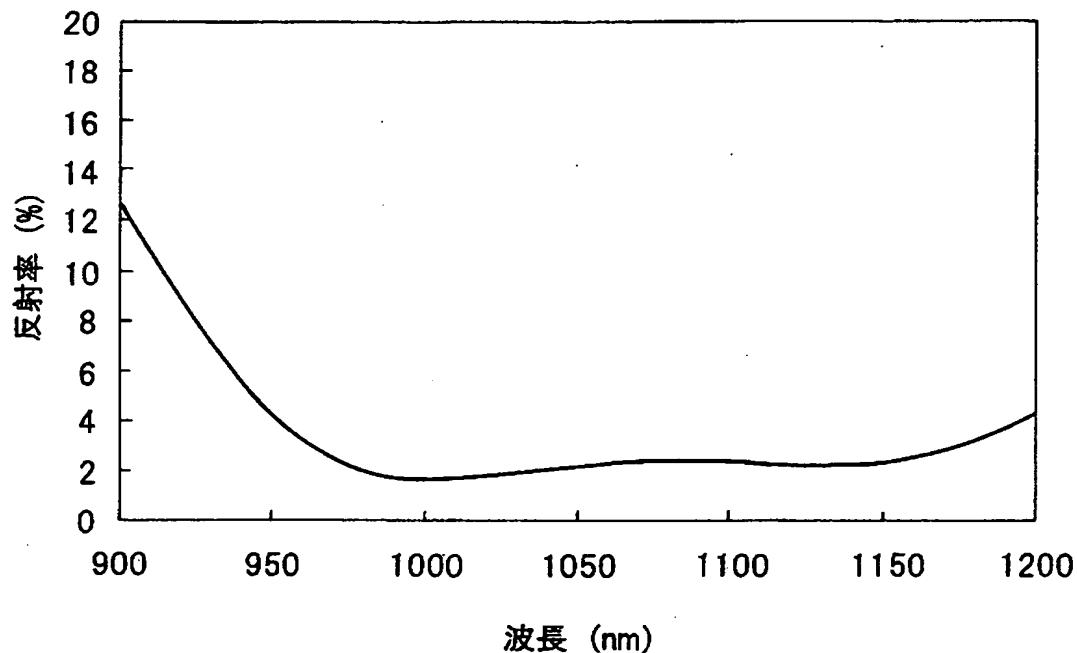
【図32】



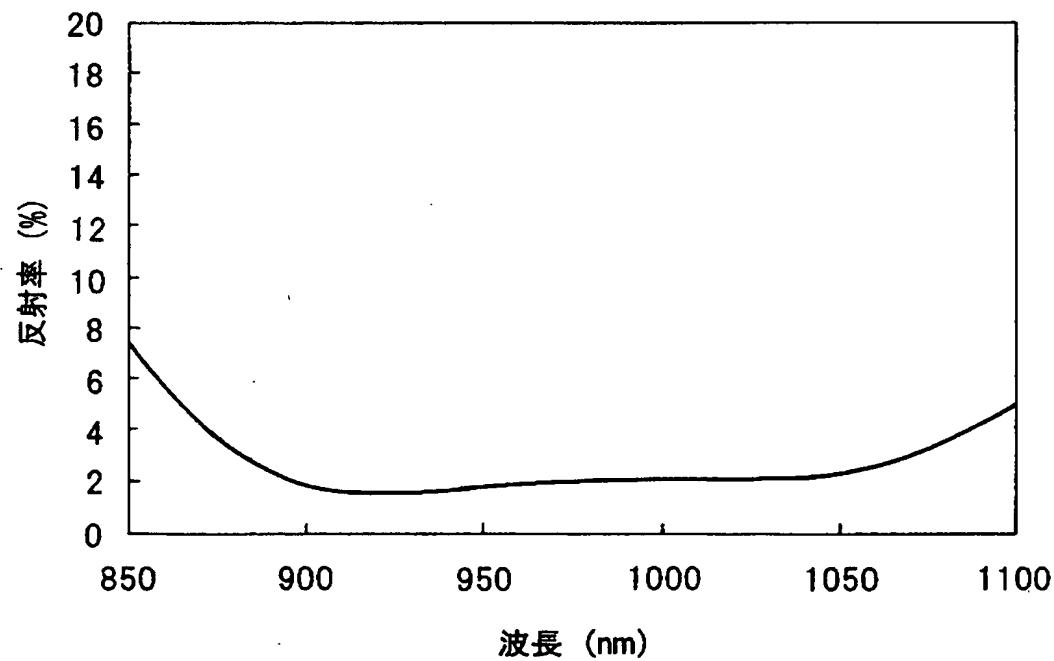
【図33】



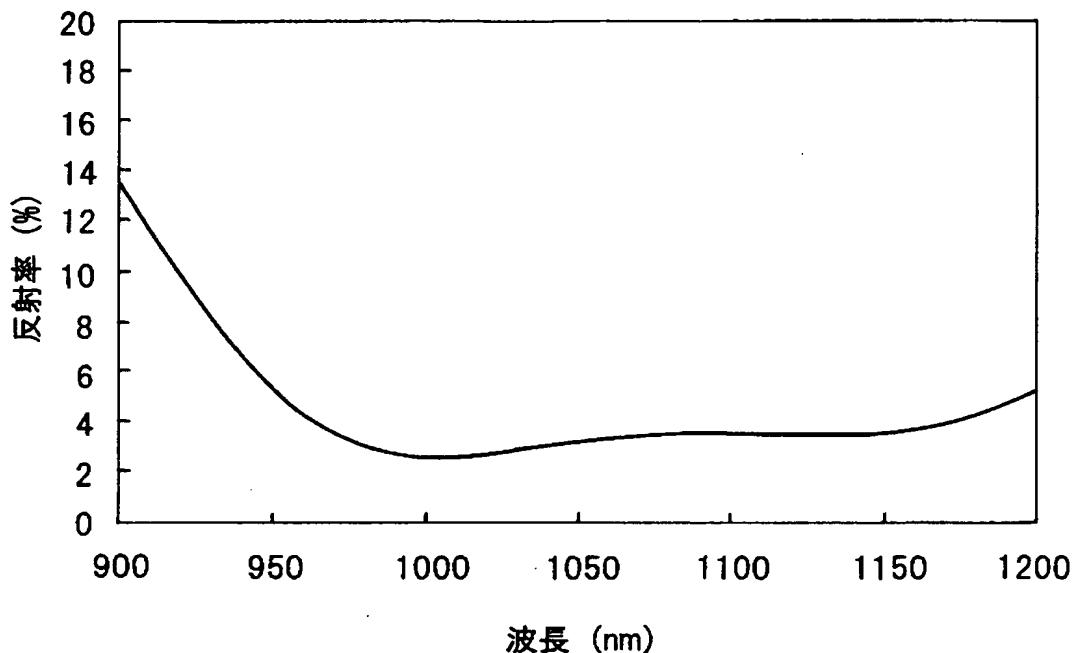
【図34】



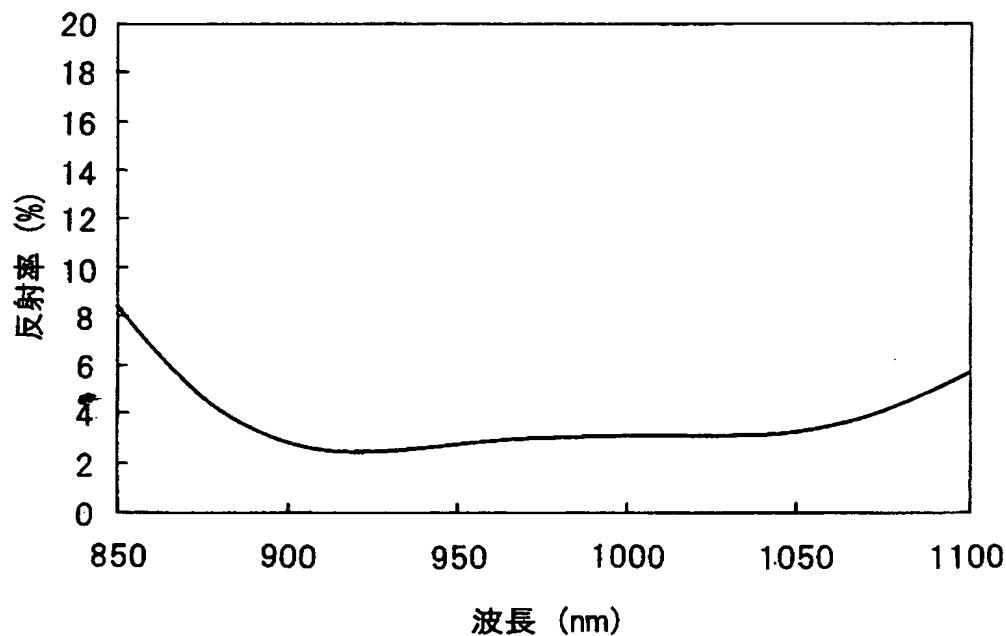
【図35】



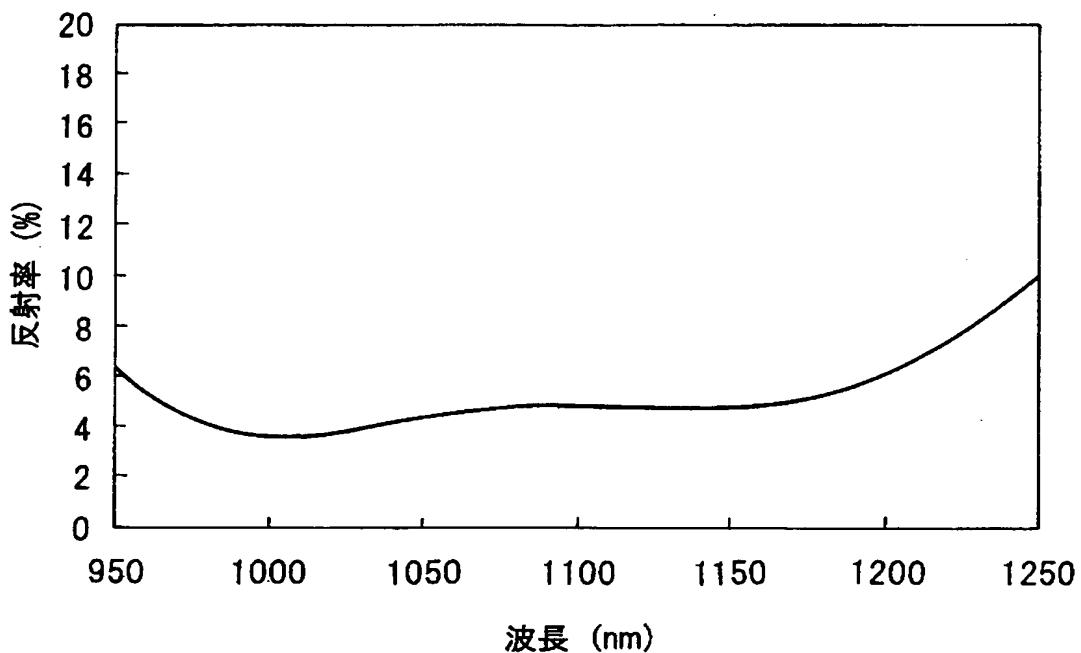
【図36】



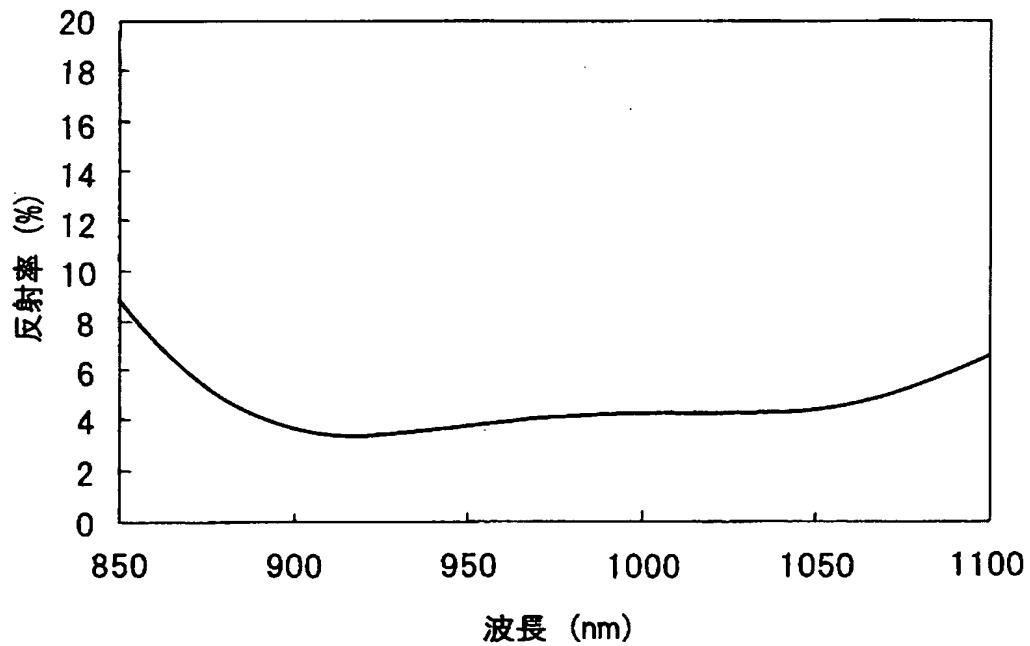
【図37】



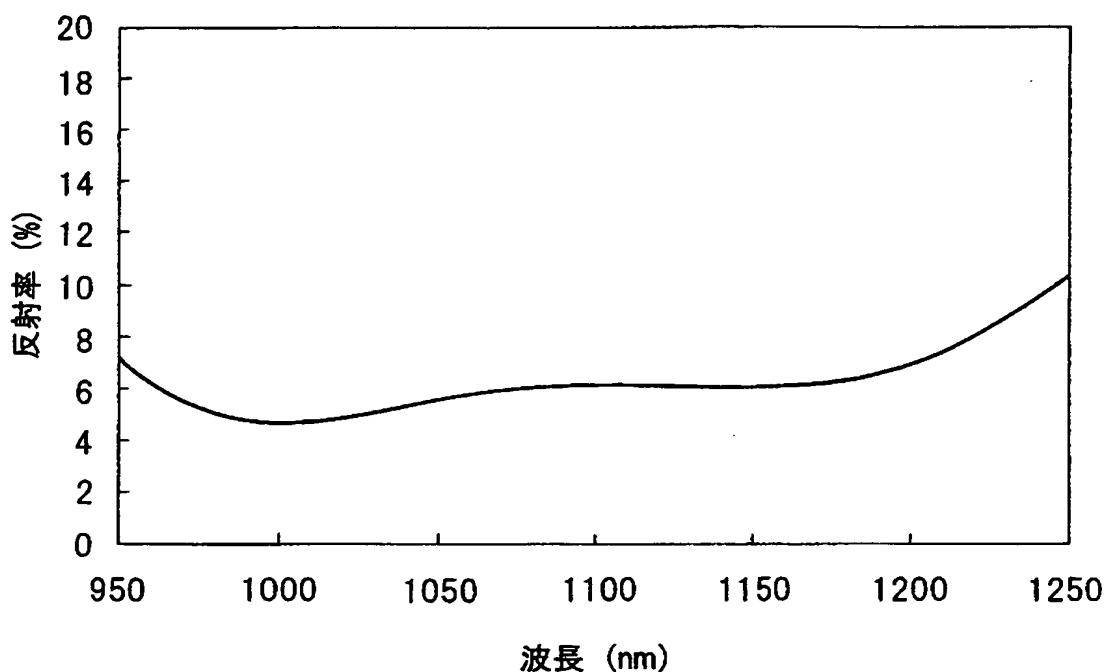
【図38】



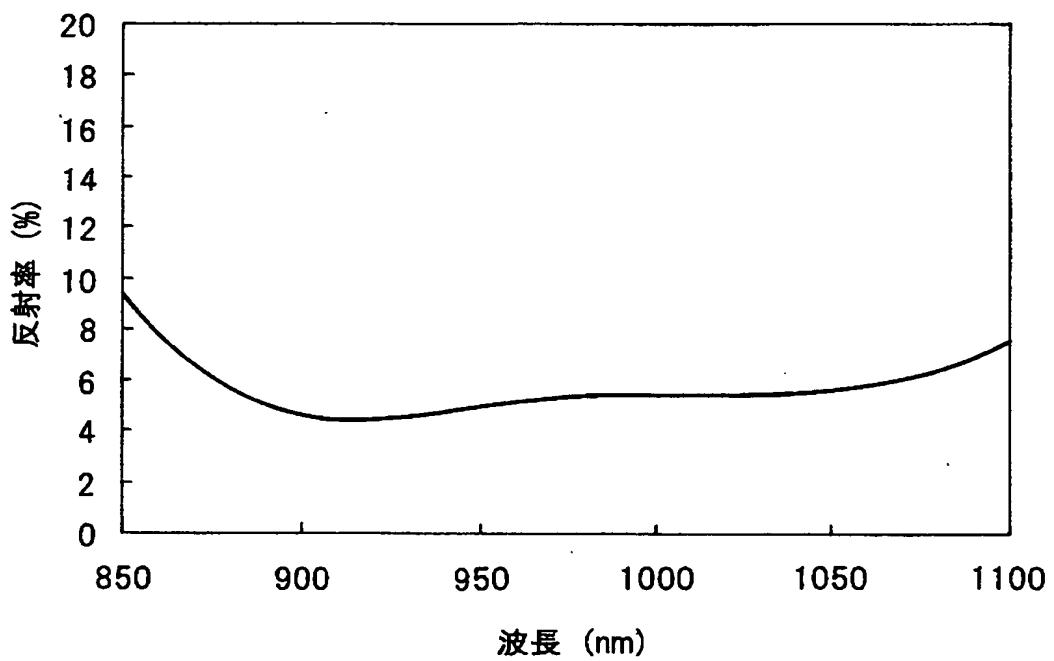
【図39】



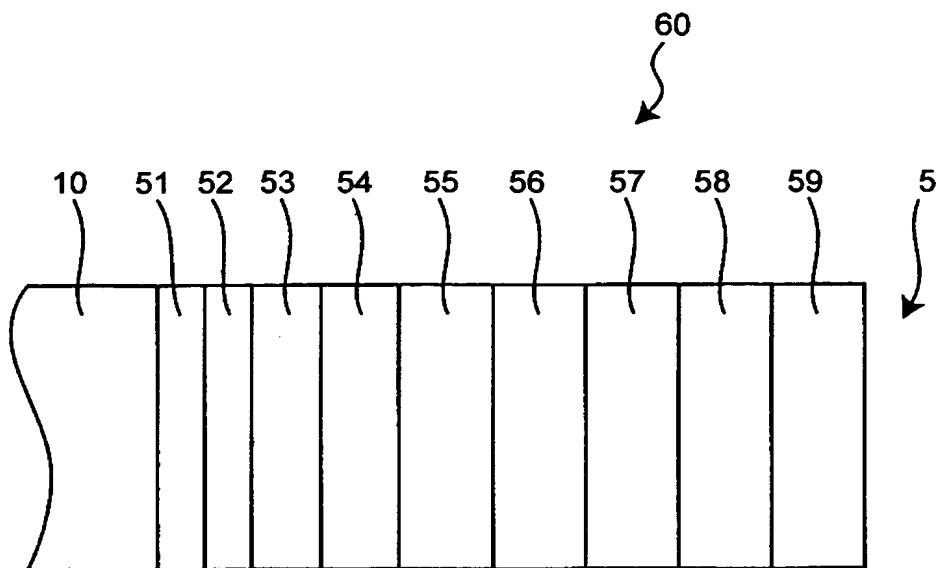
【図40】



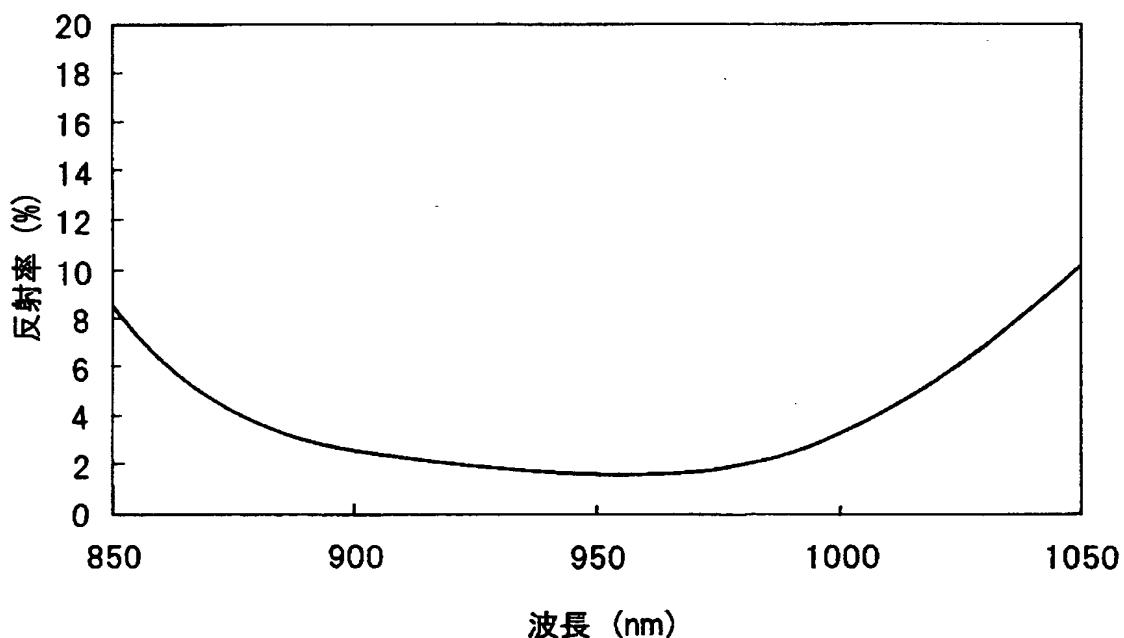
【図41】



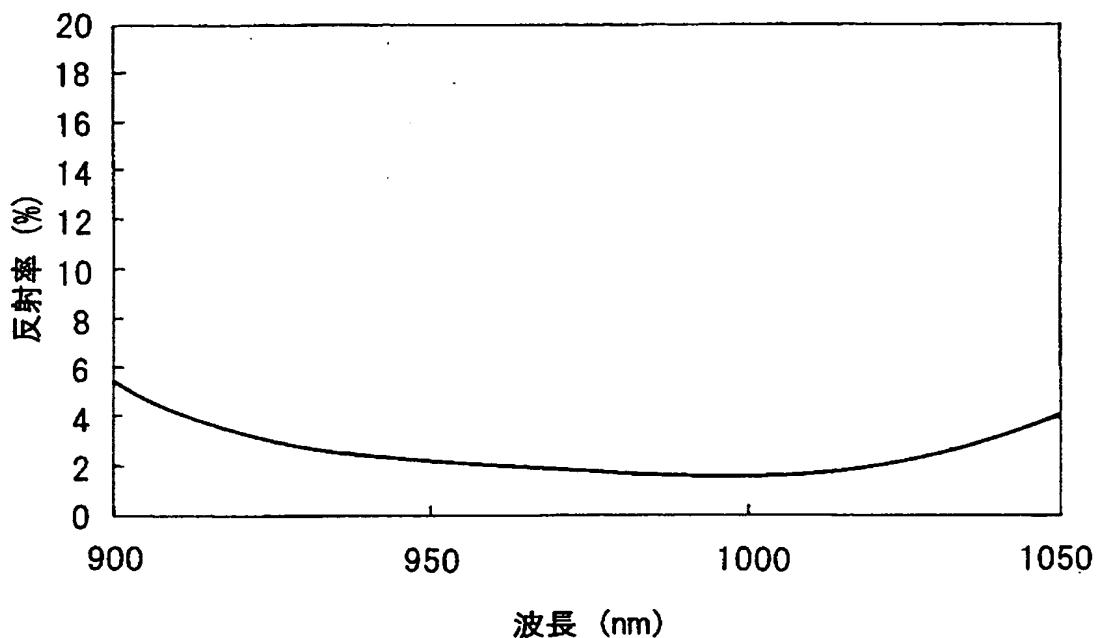
【図42】



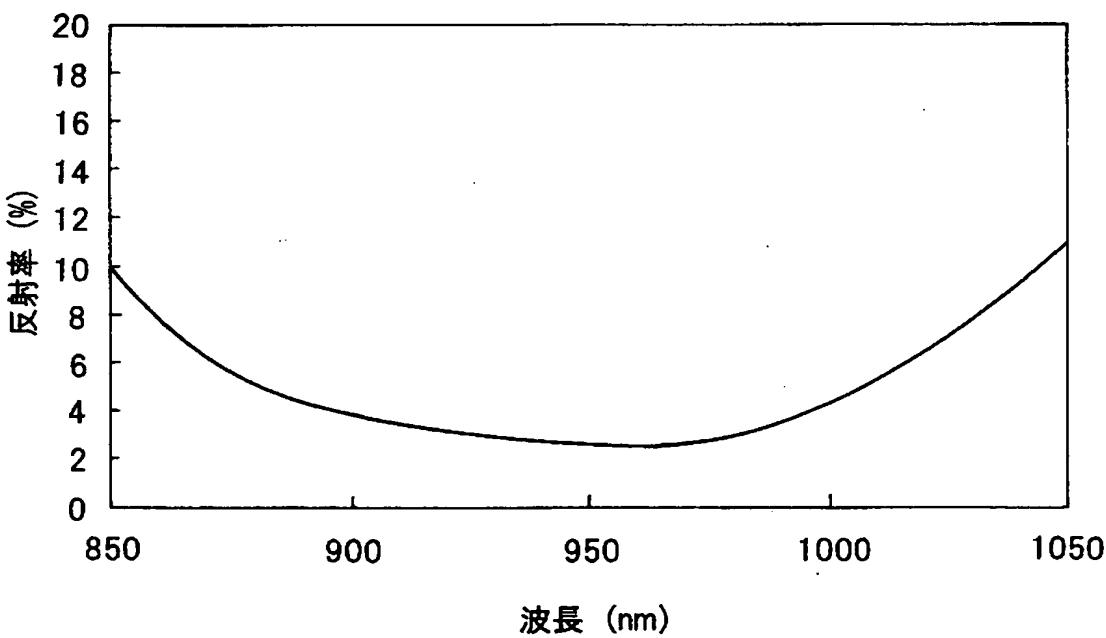
【図43】



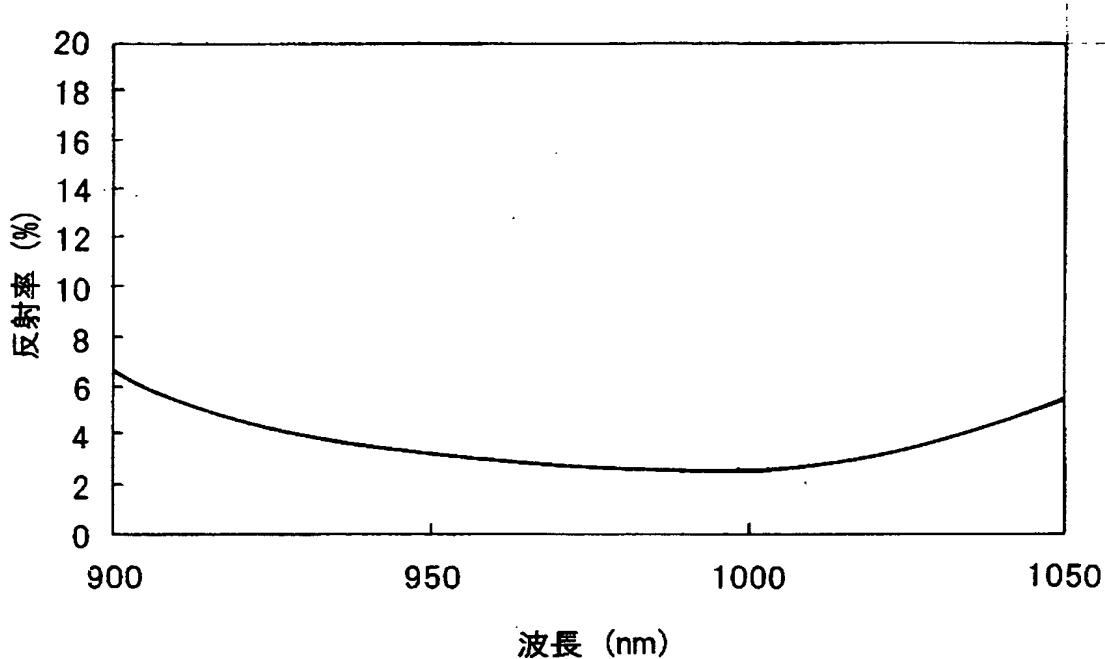
【図44】



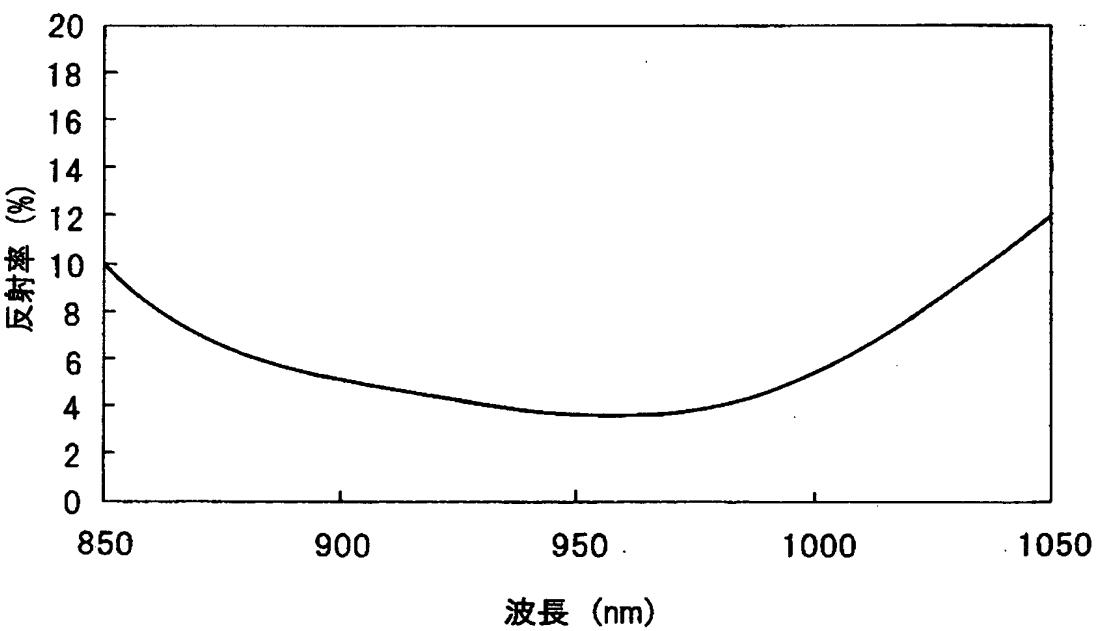
【図45】



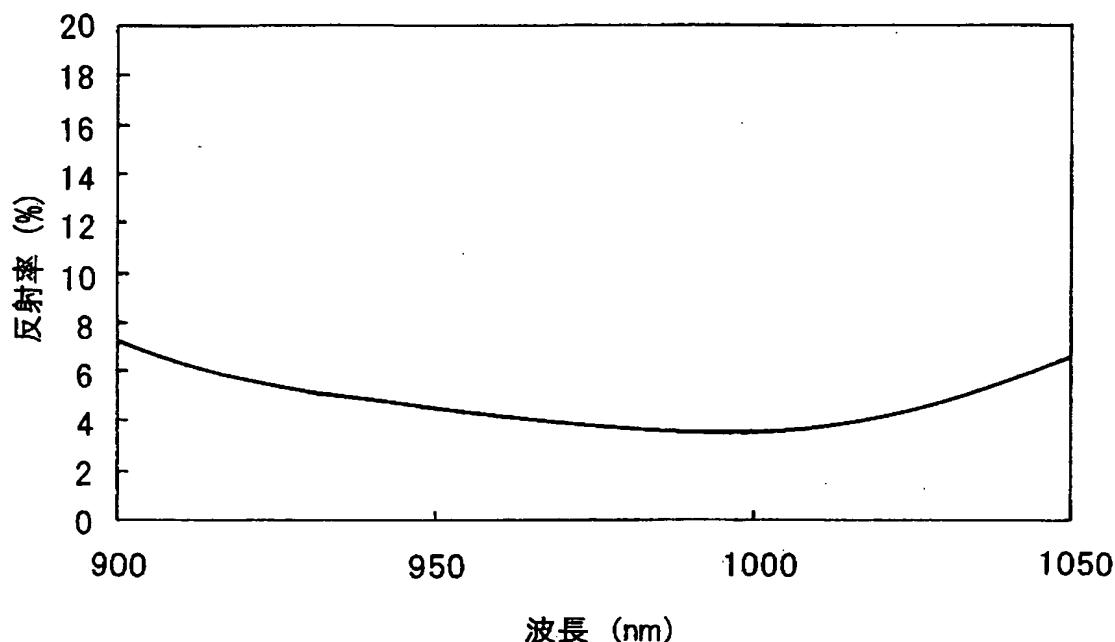
【図46】



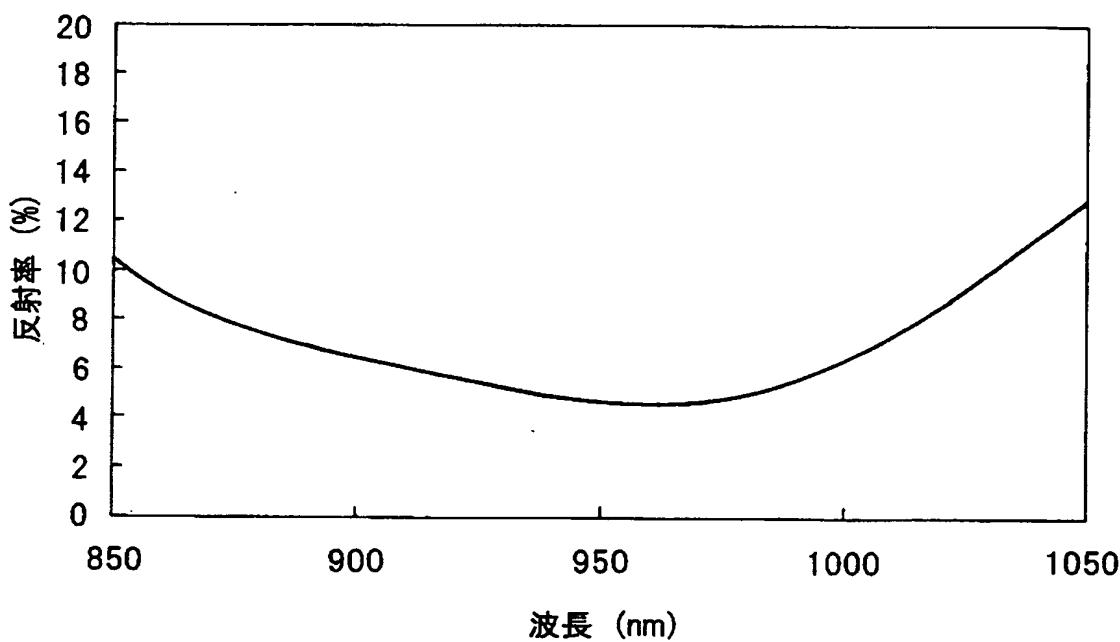
【図47】



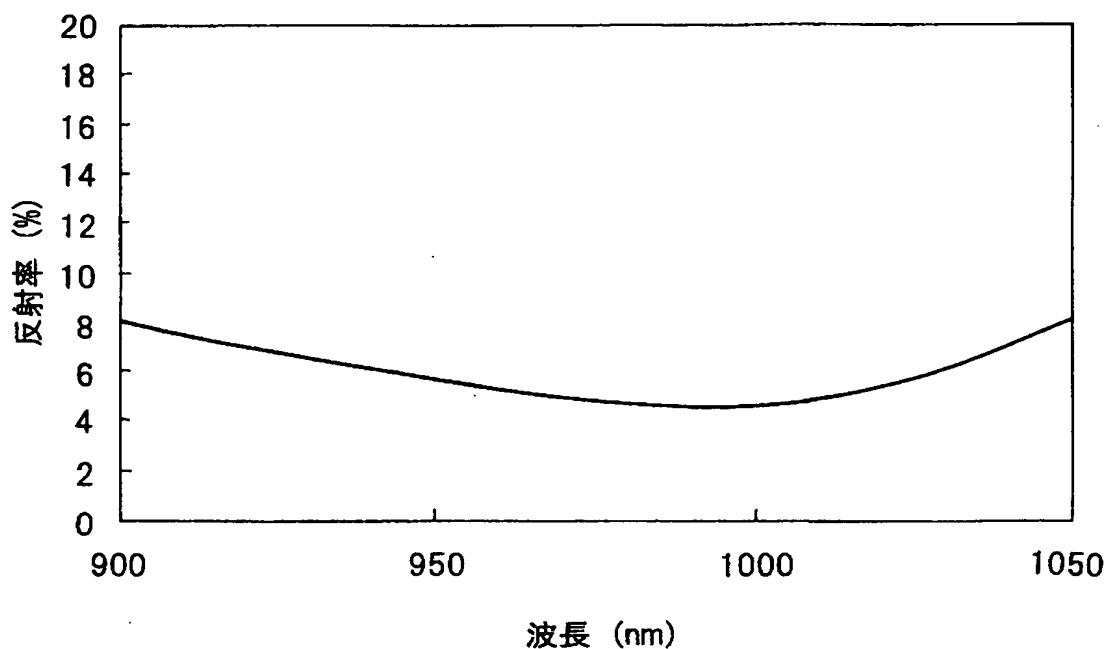
【図48】



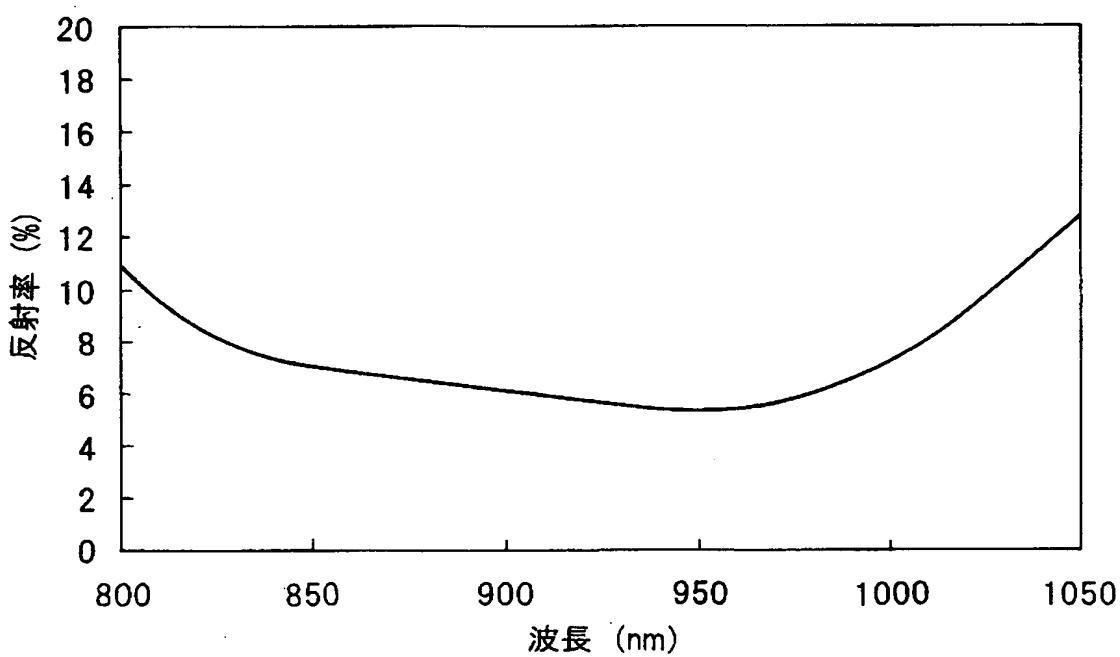
【図49】



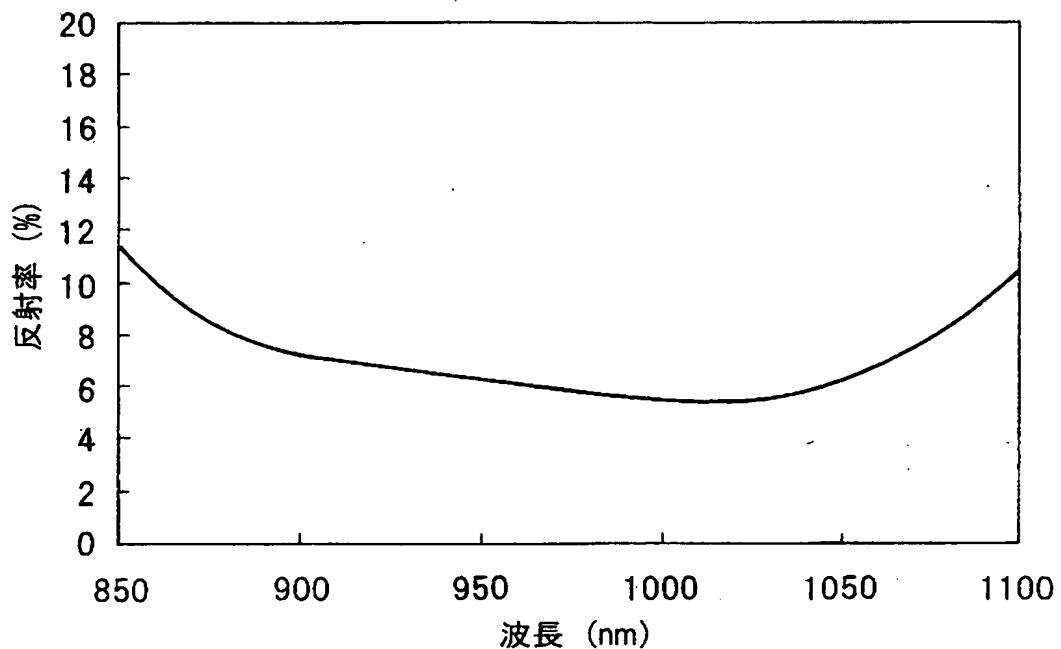
【図50】



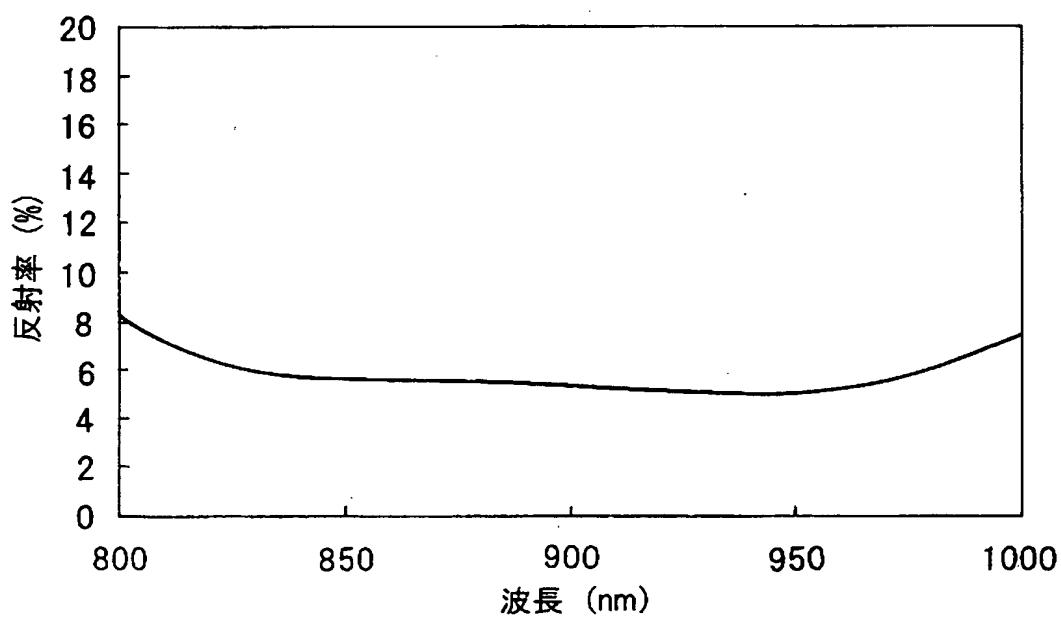
【図51】



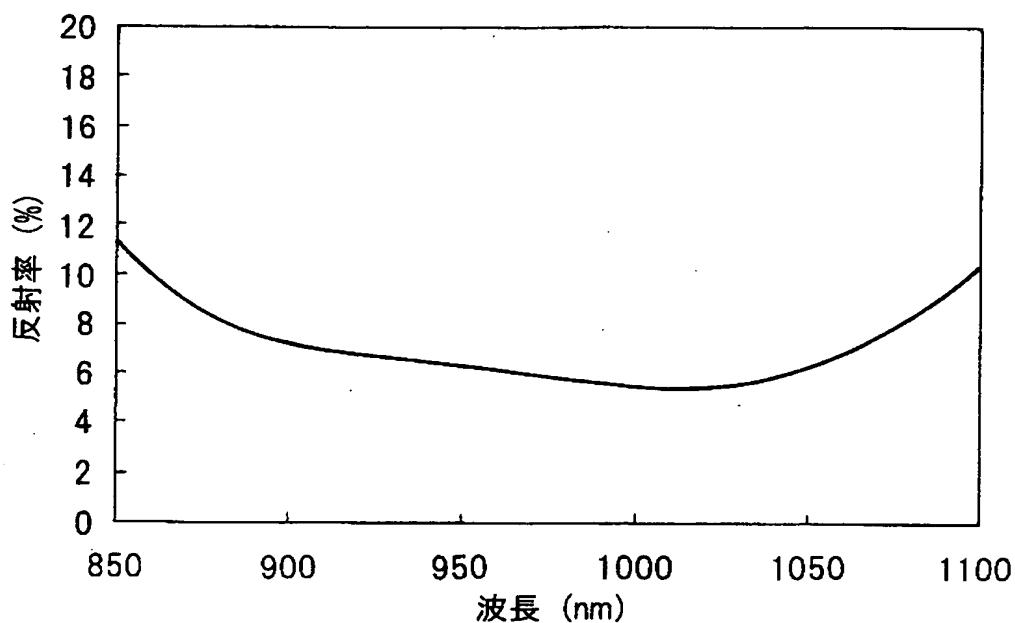
【図52】



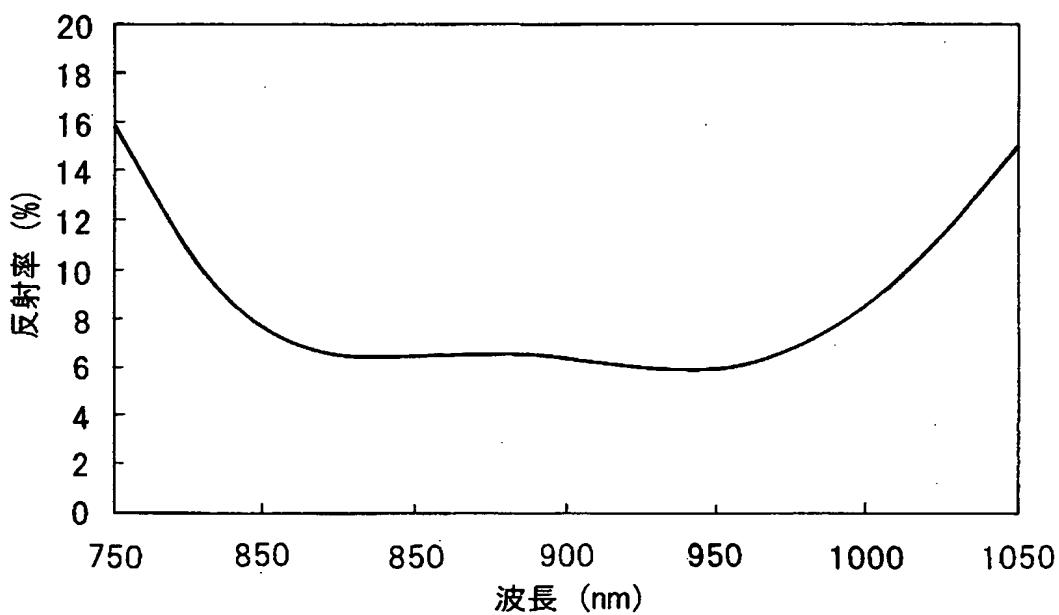
【図53】



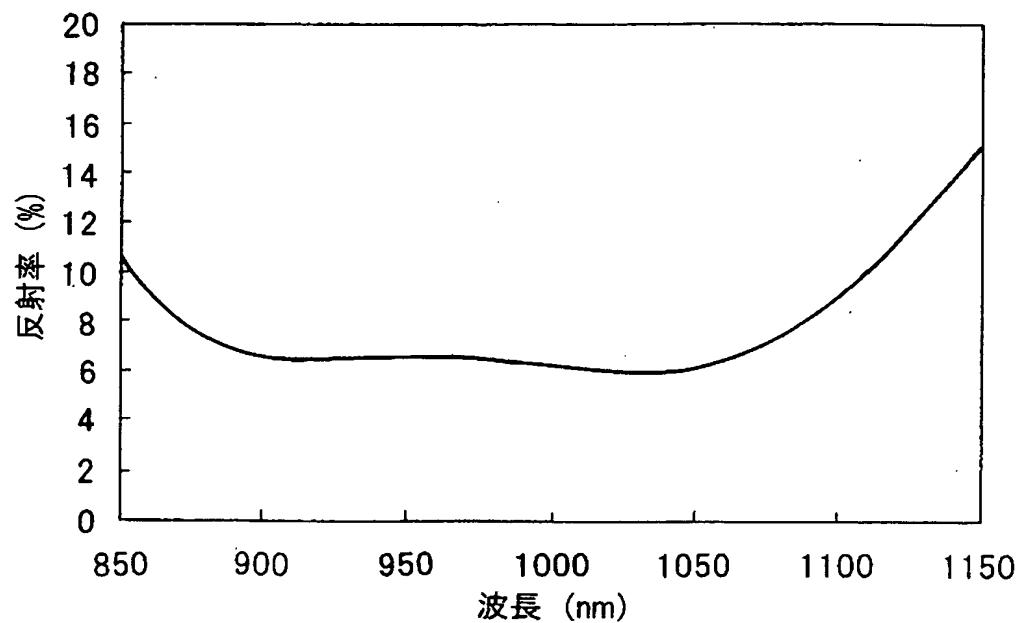
【図54】



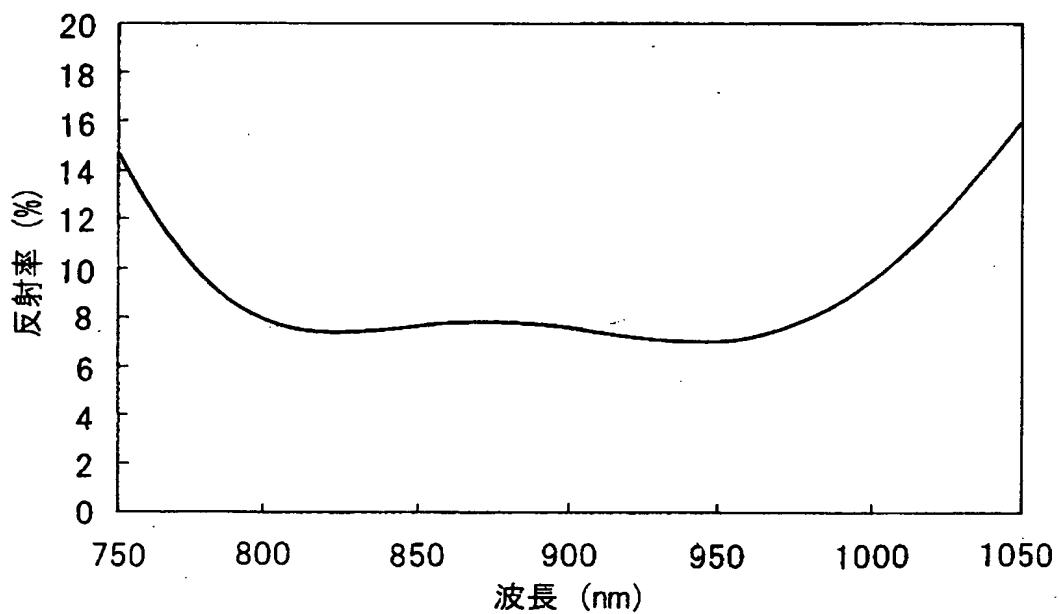
【図55】



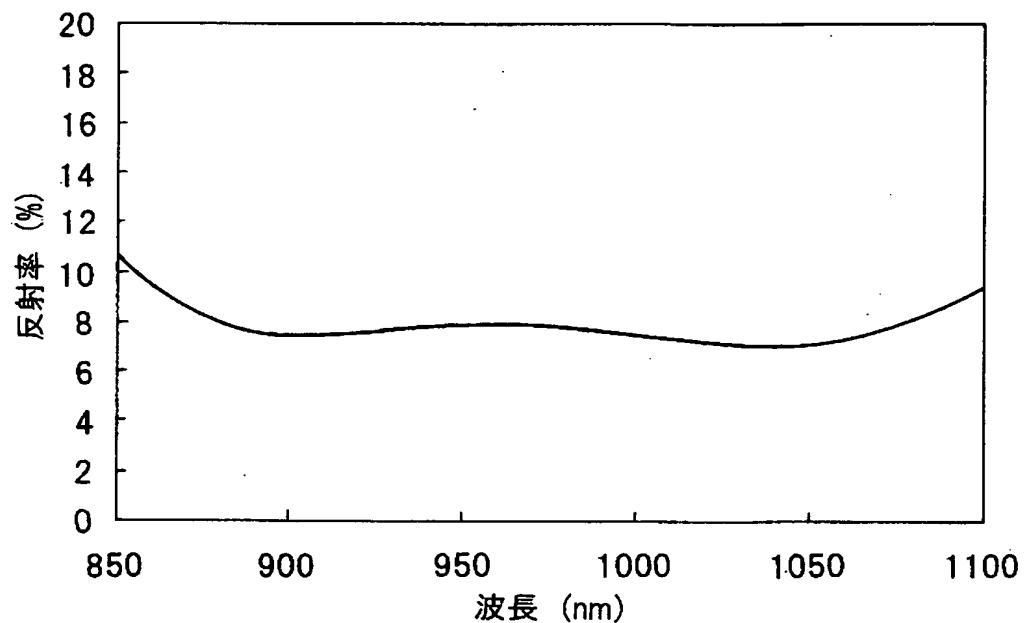
【図56】



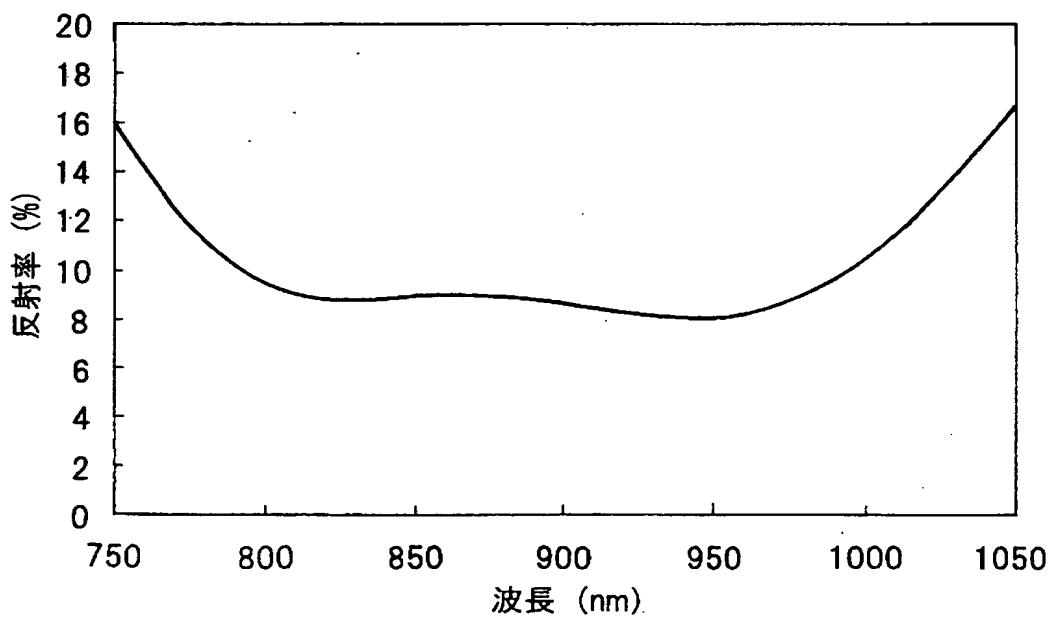
【図57】



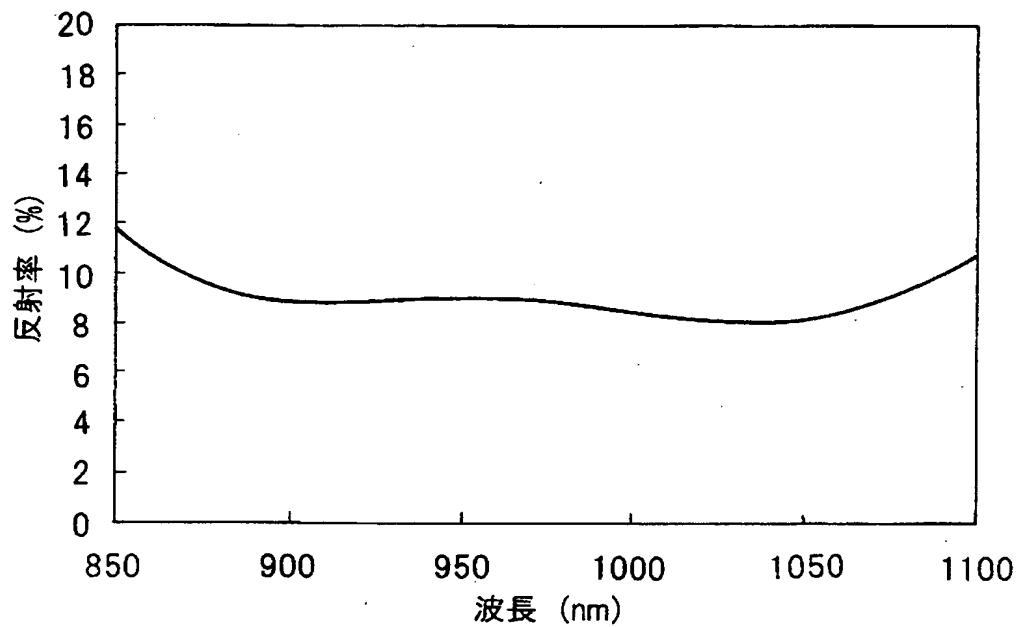
【図58】



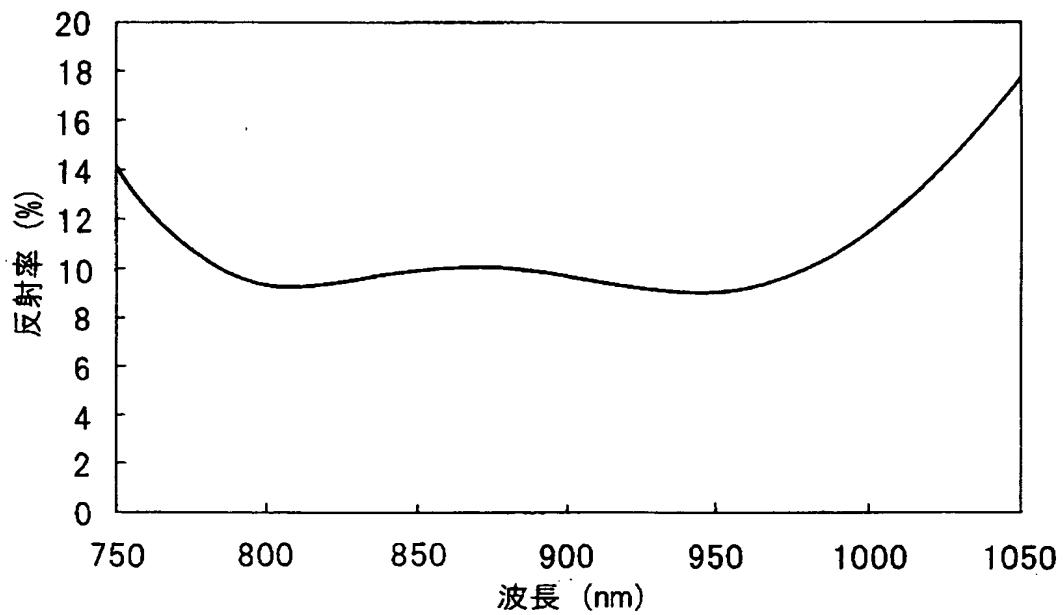
【図59】



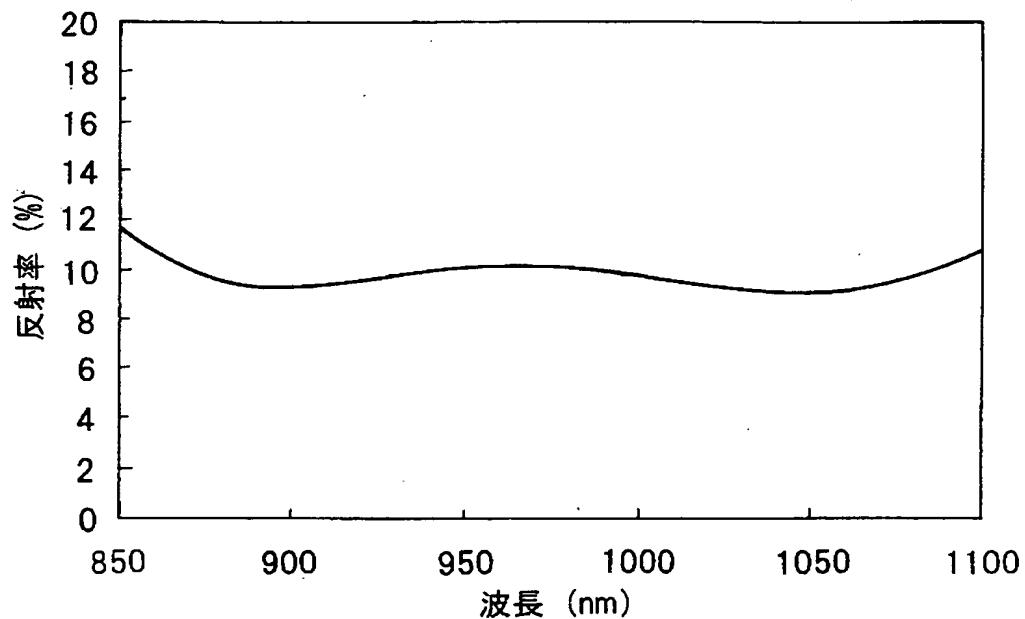
【図60】



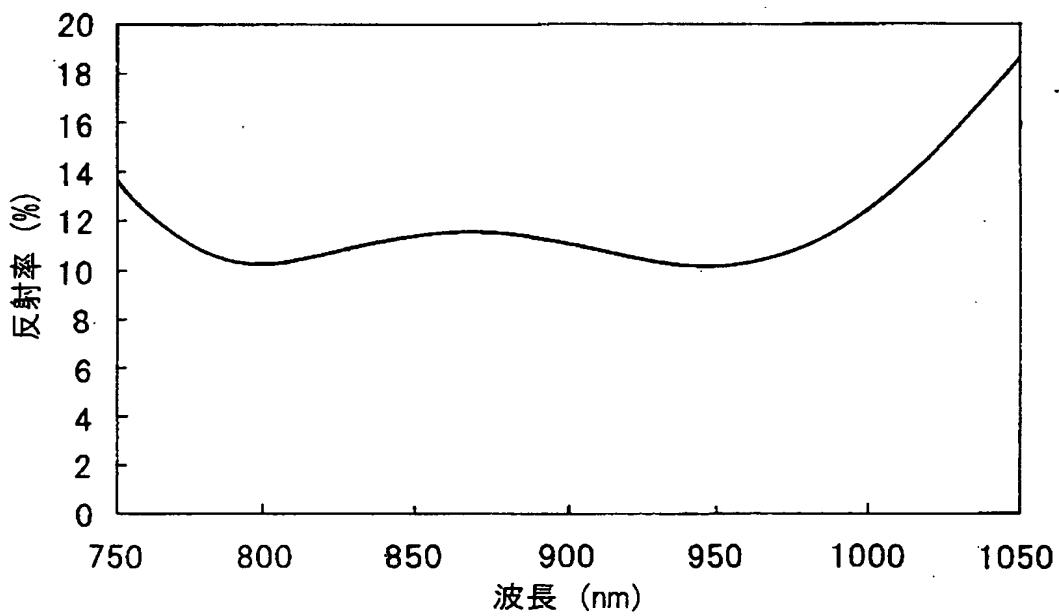
【図61】



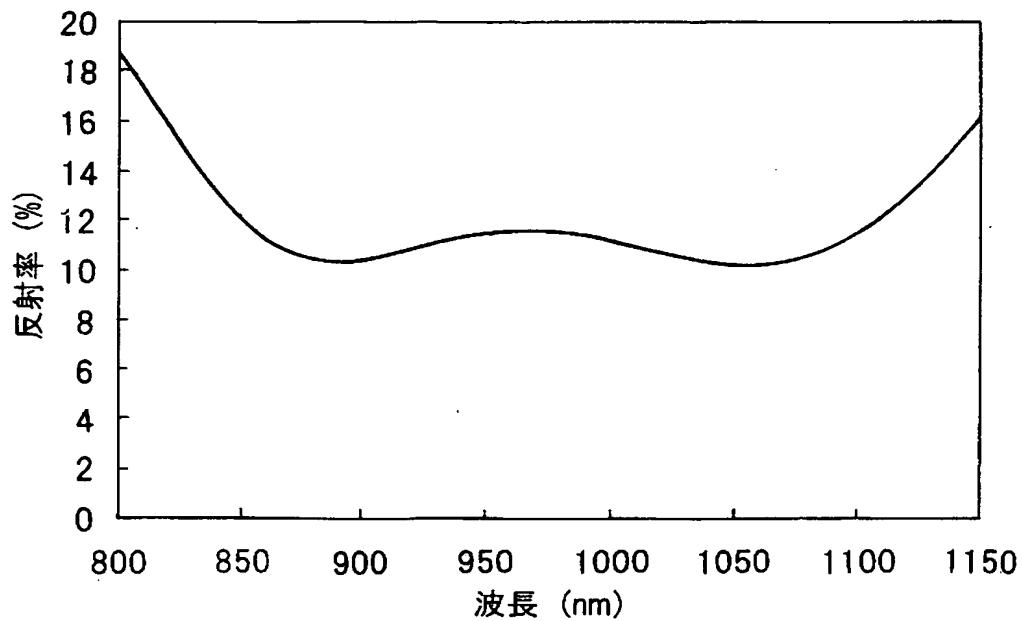
【図62】



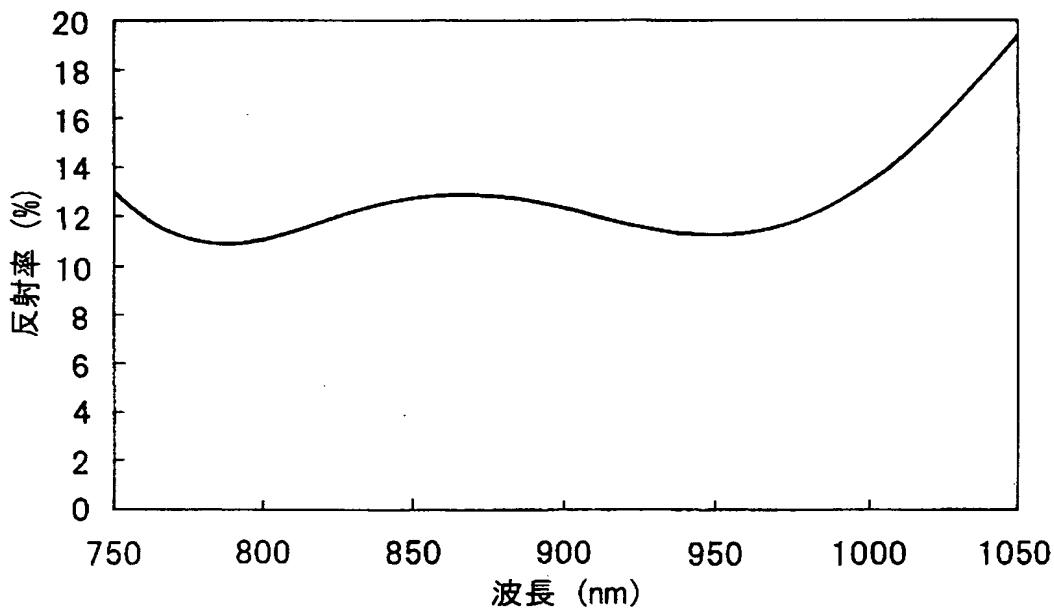
【図63】



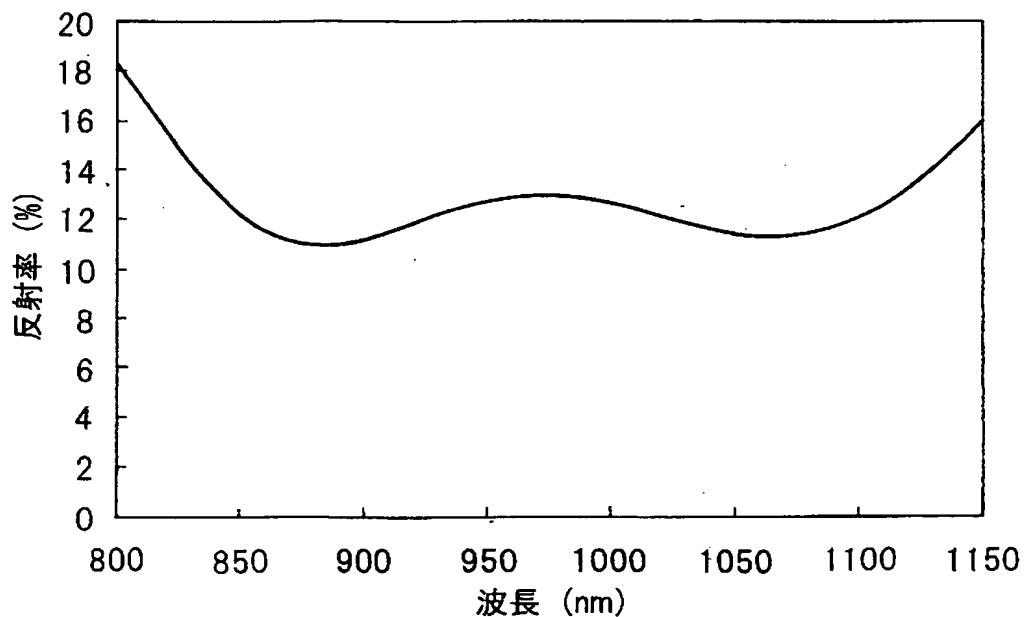
【図64】



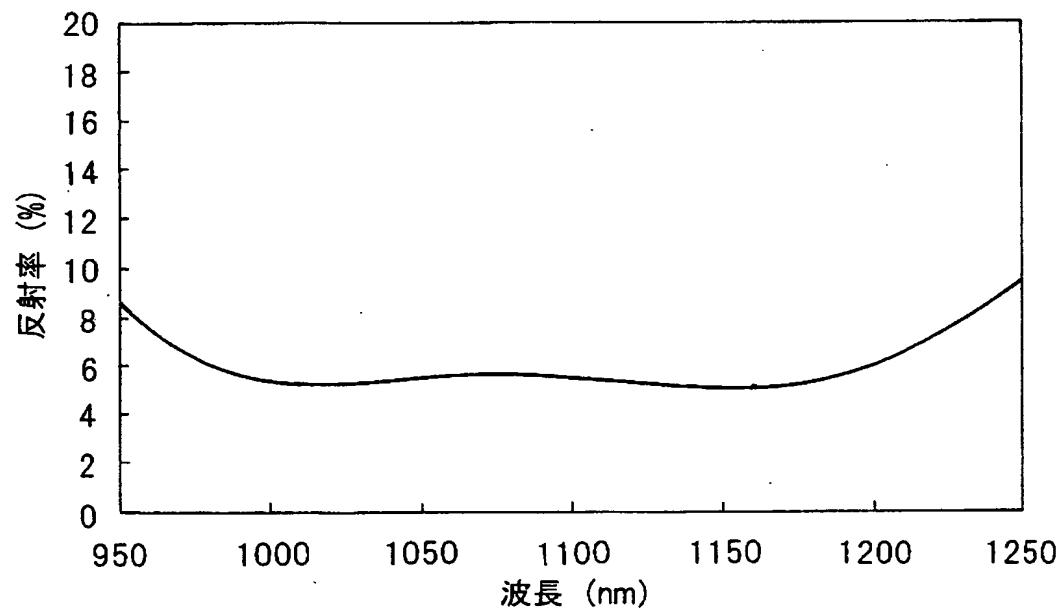
【図65】



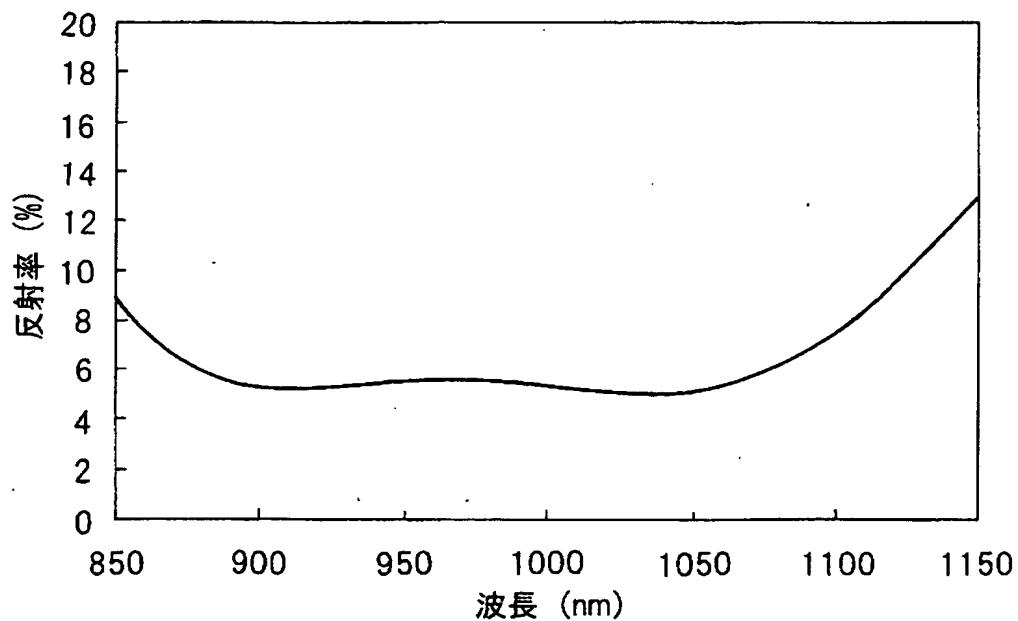
【図 6 6】



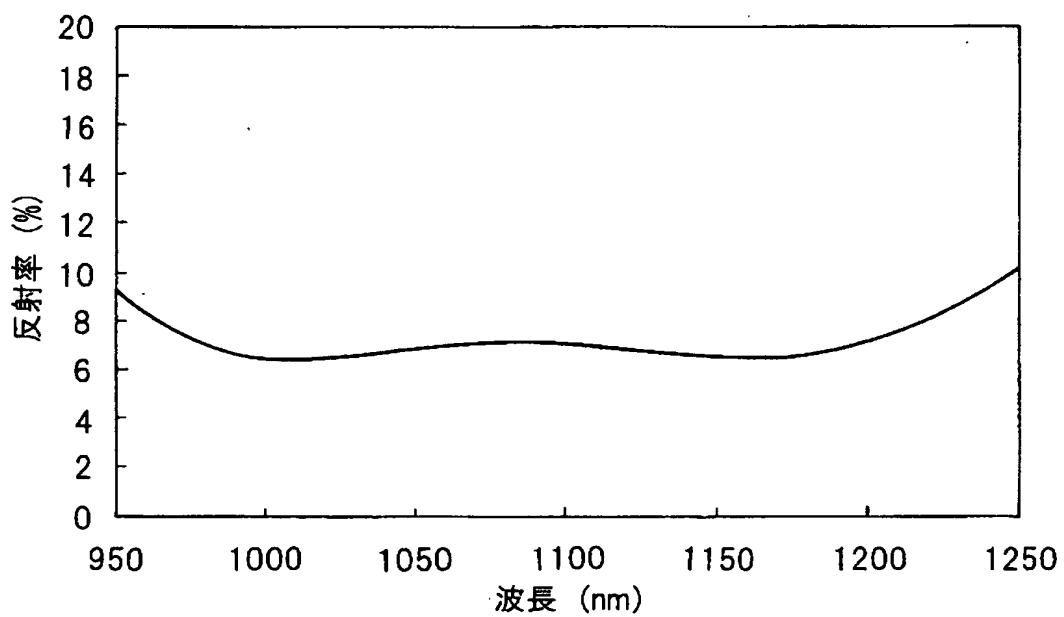
【図 6 7】



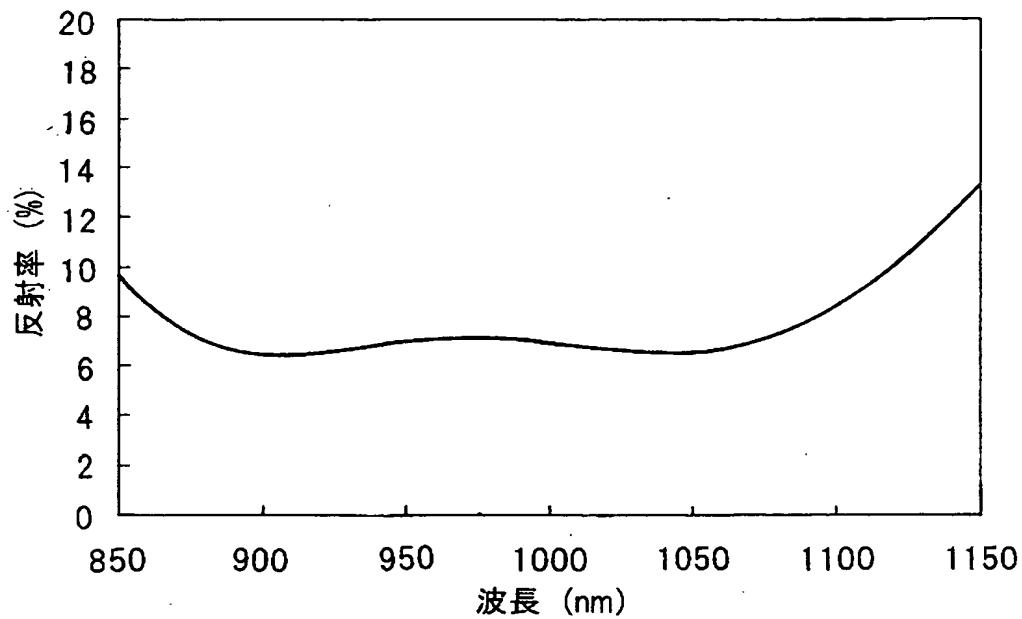
【図68】



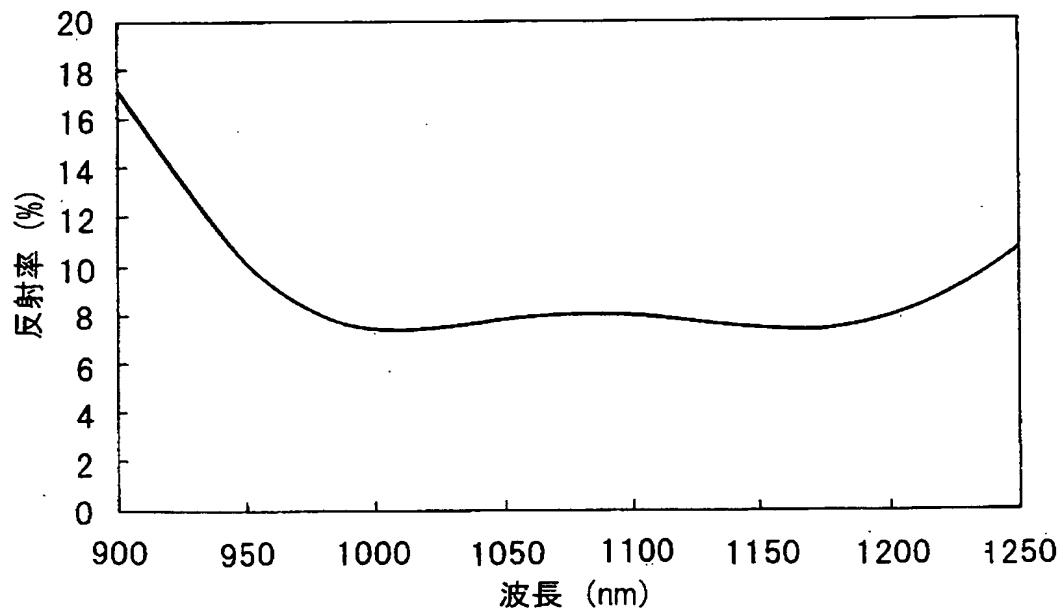
【図69】



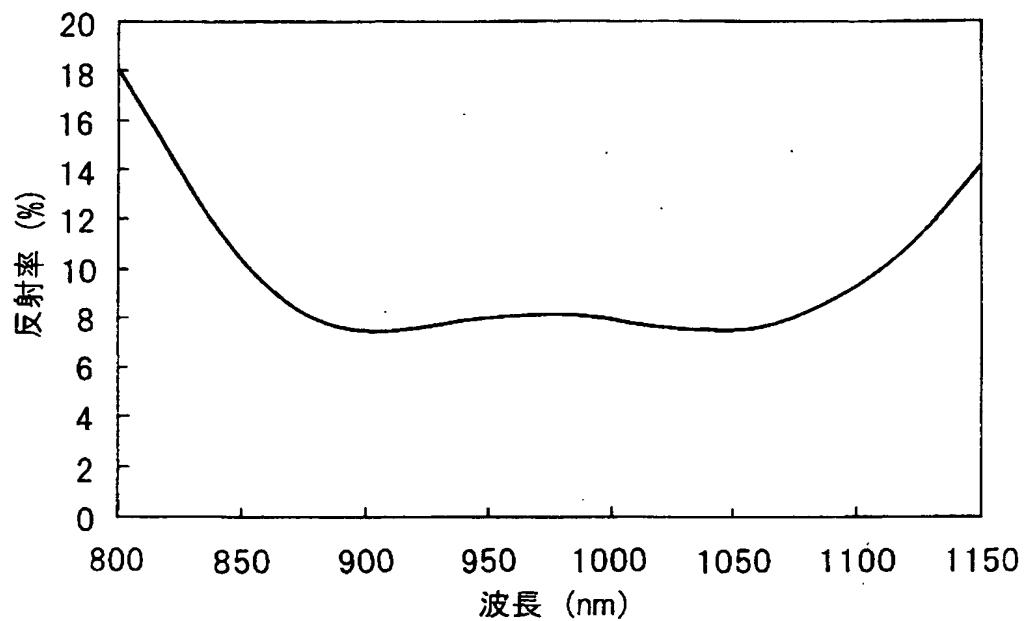
【図70】



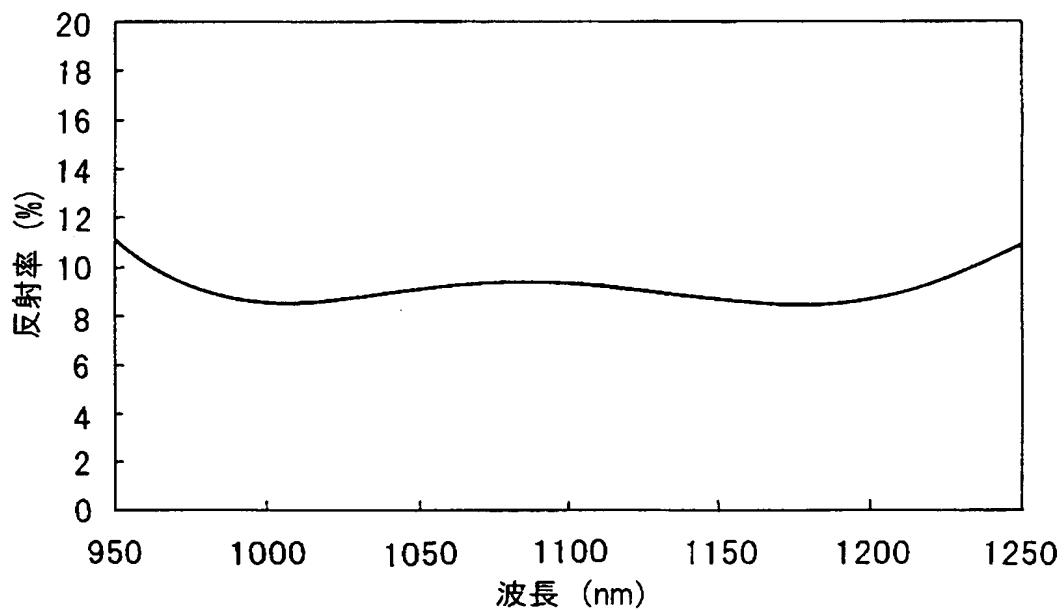
【図71】



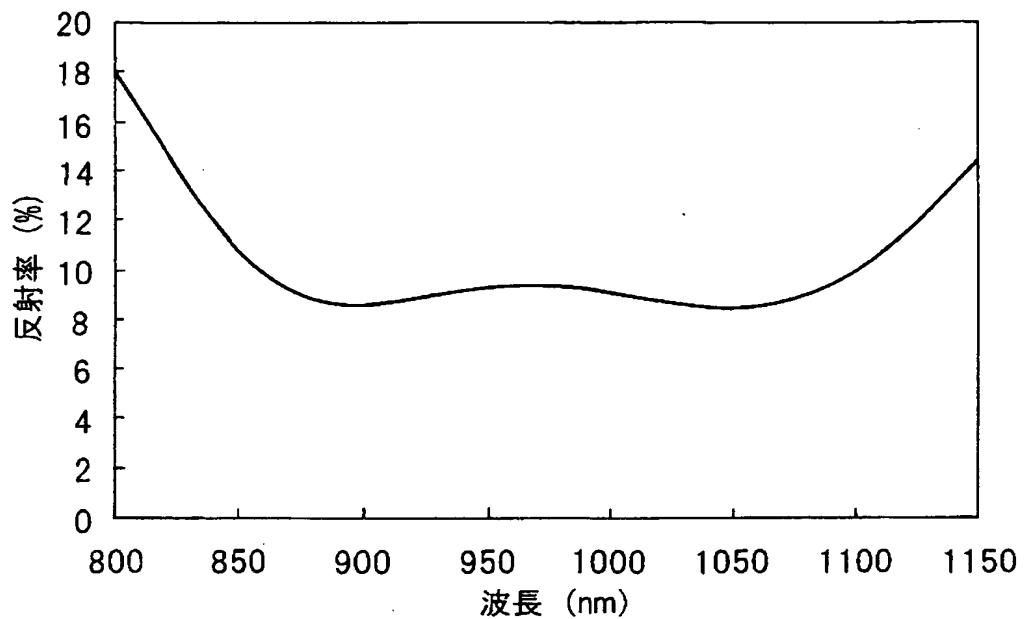
【図72】



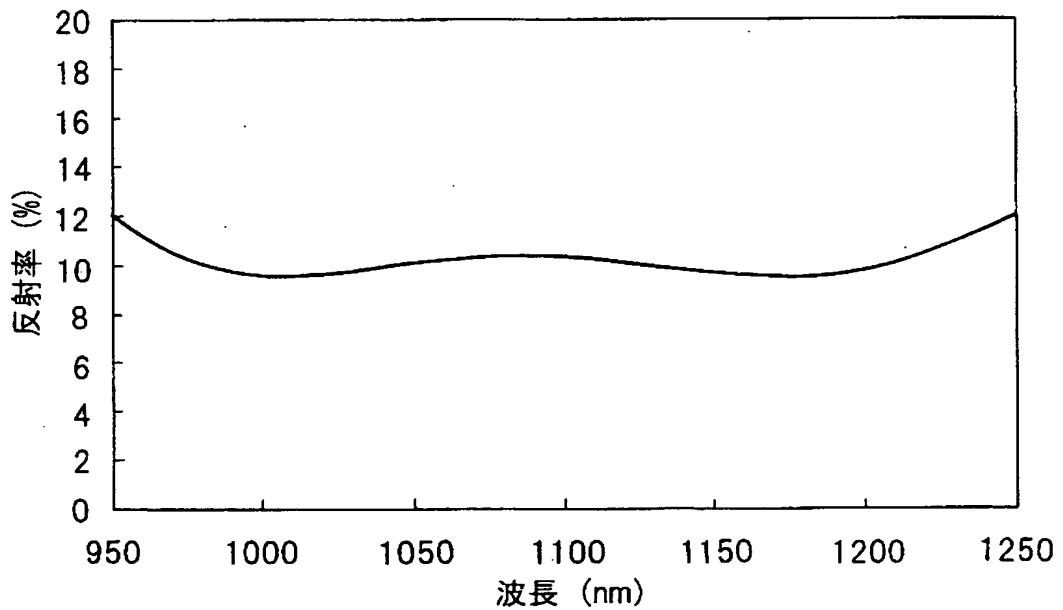
【図73】



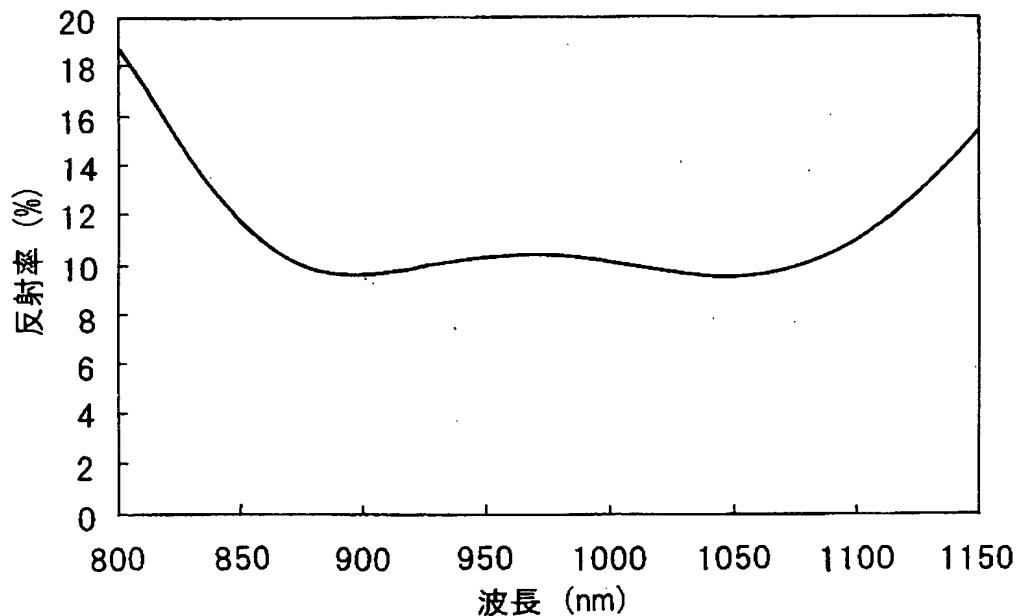
【図74】



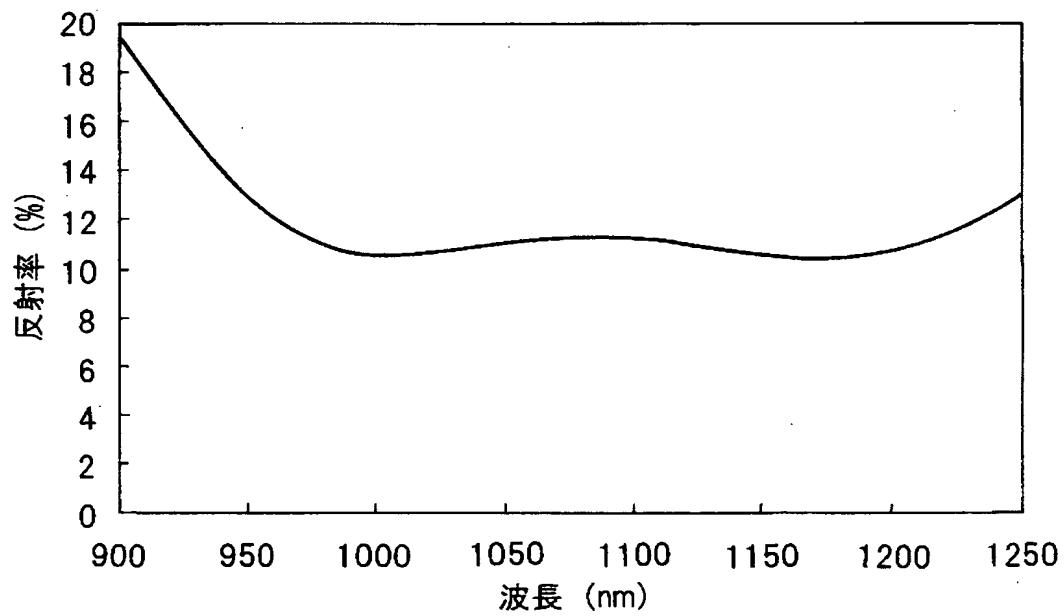
【図75】



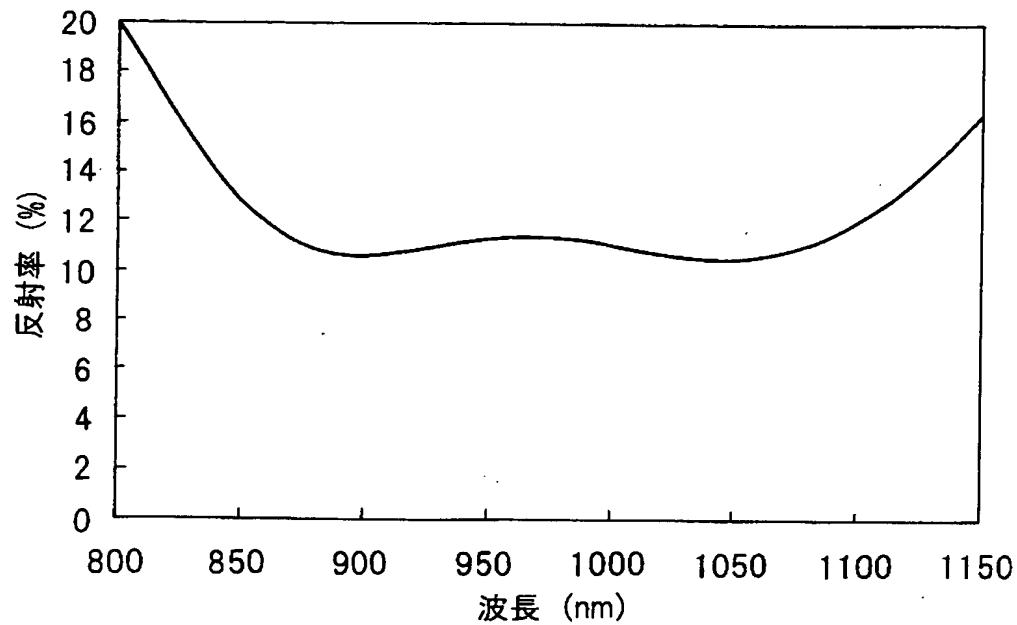
【図76】



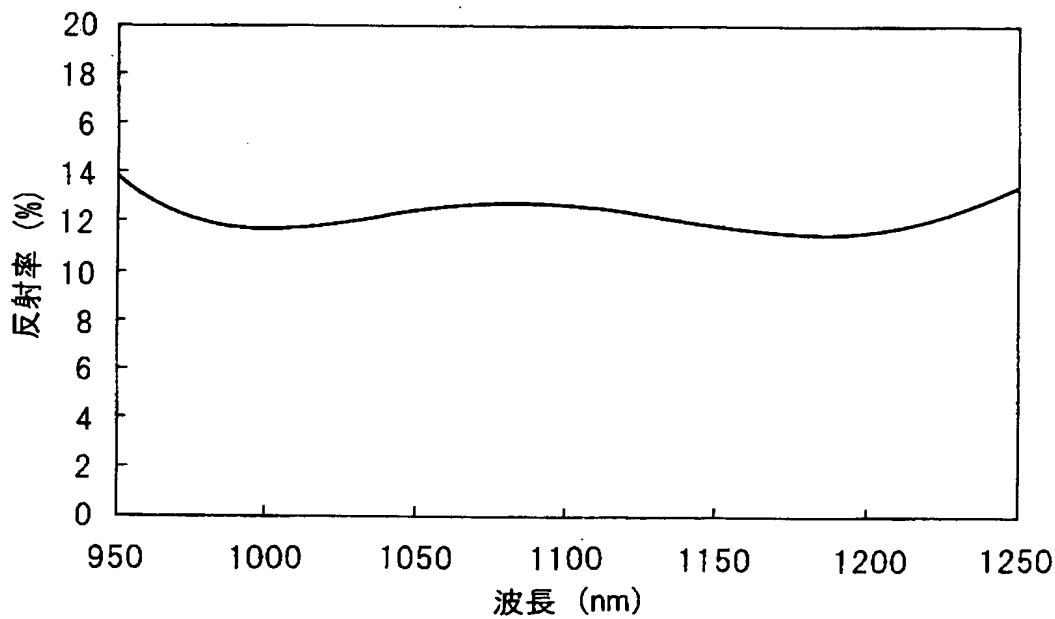
【図77】



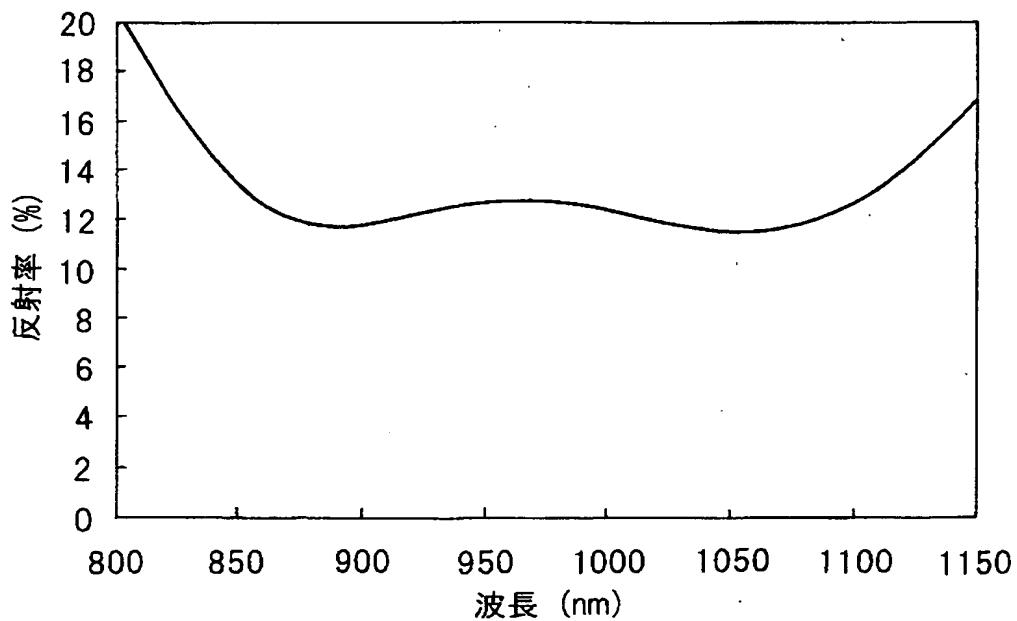
【図78】



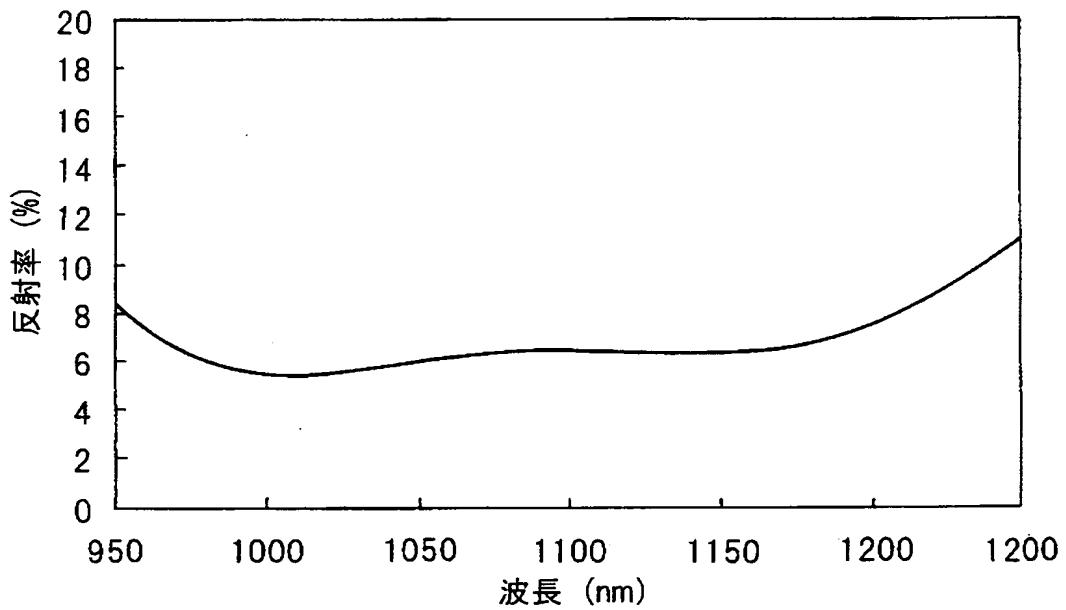
【図79】



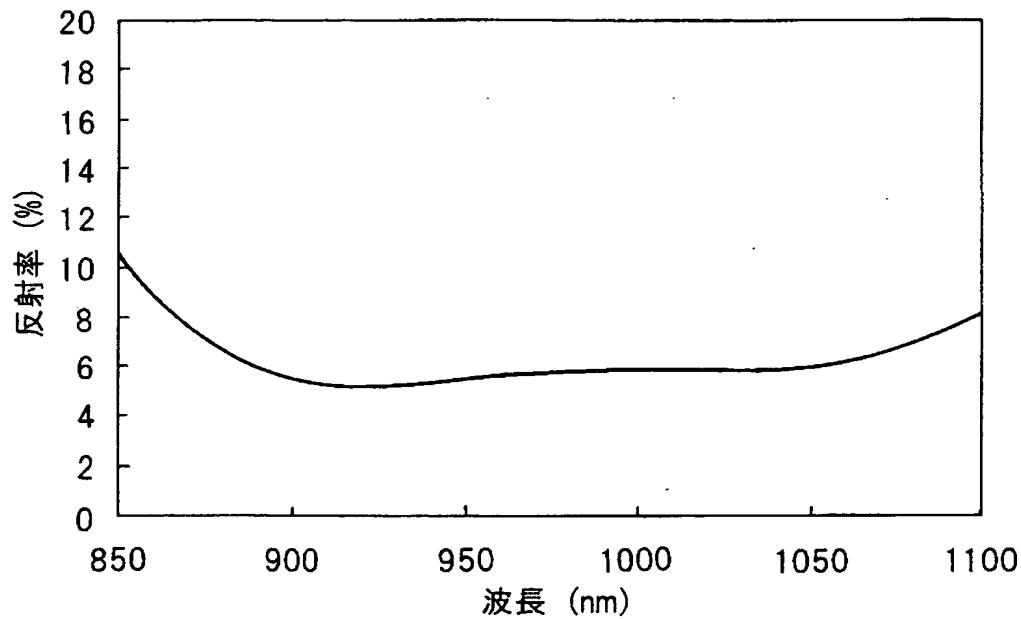
【図80】



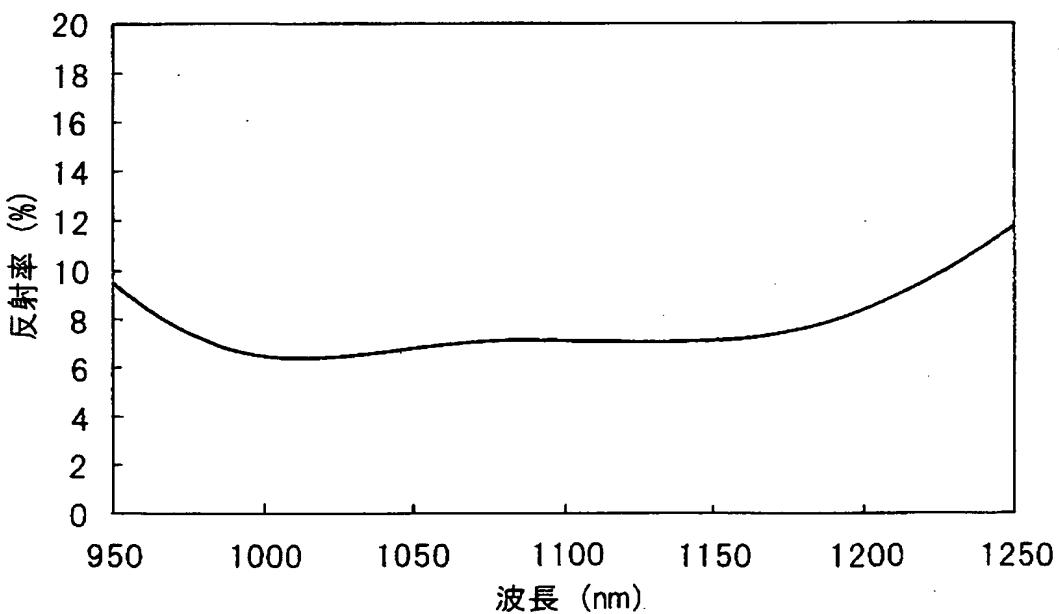
【図81】



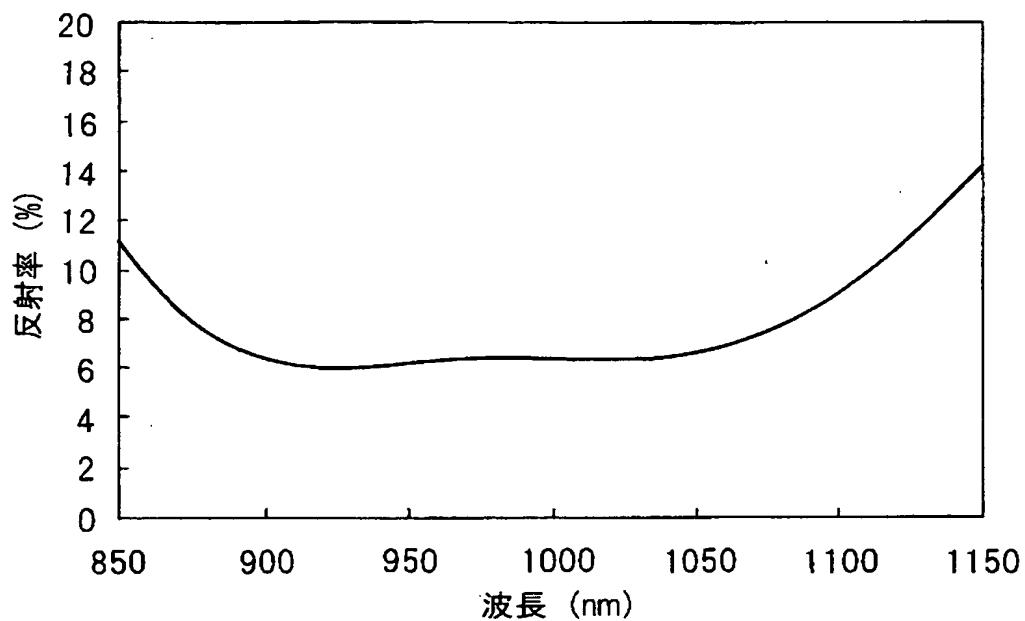
【図82】



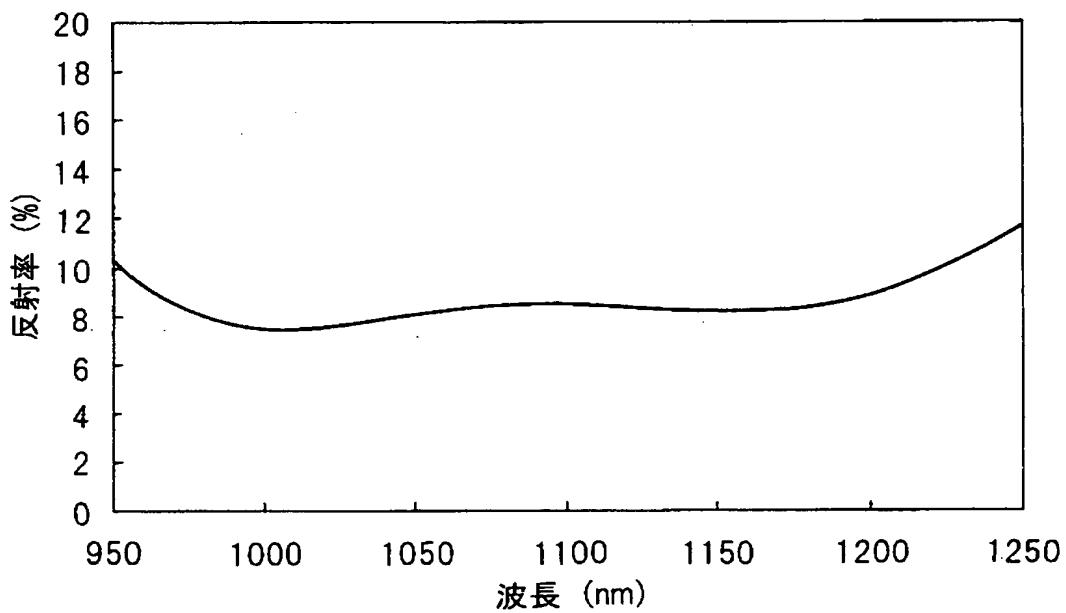
【図83】



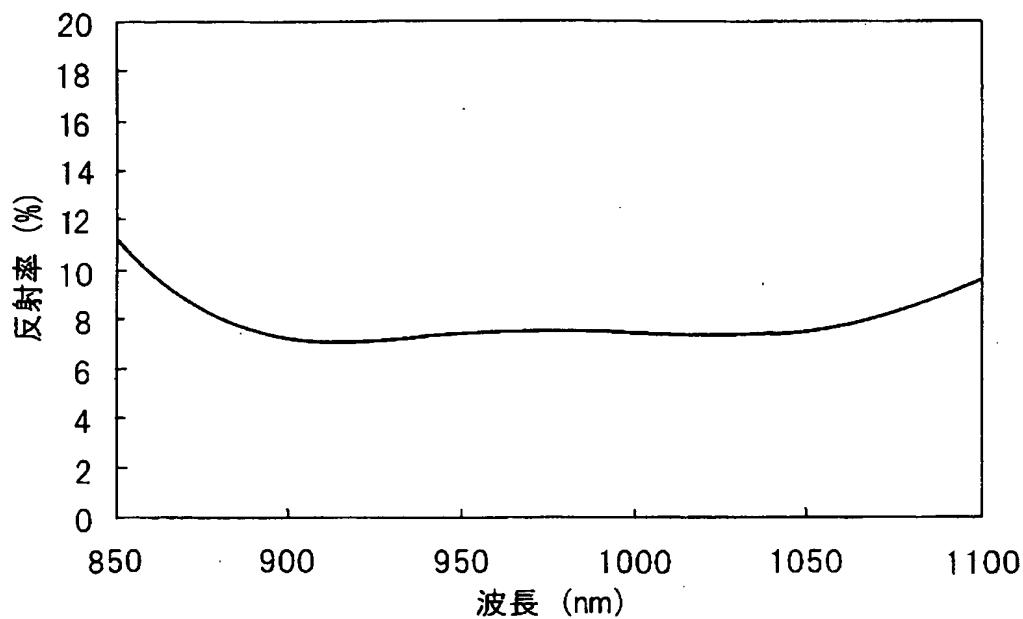
【図84】



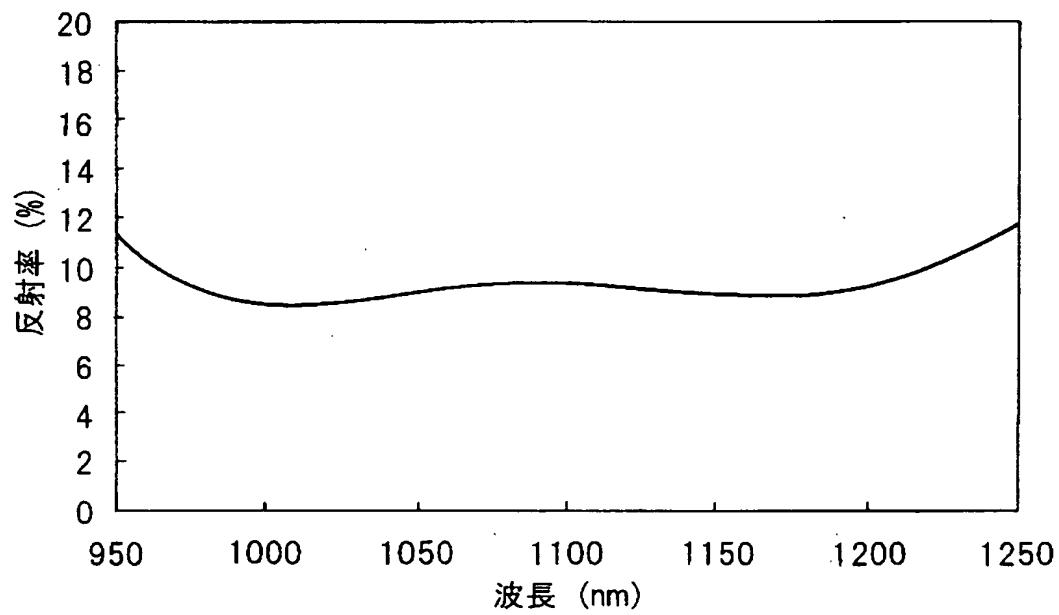
【図85】



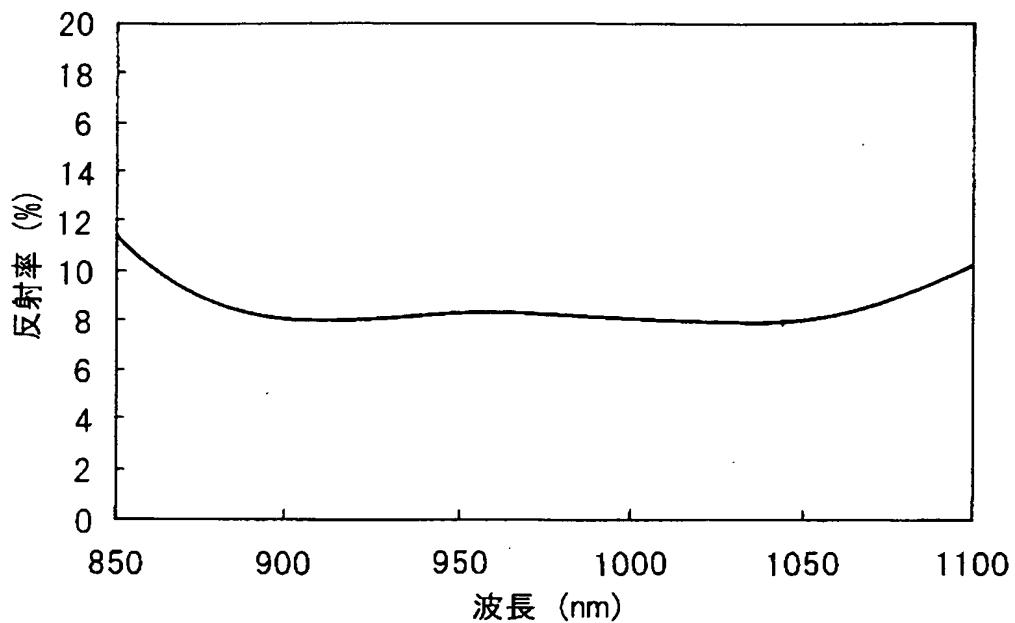
【図86】



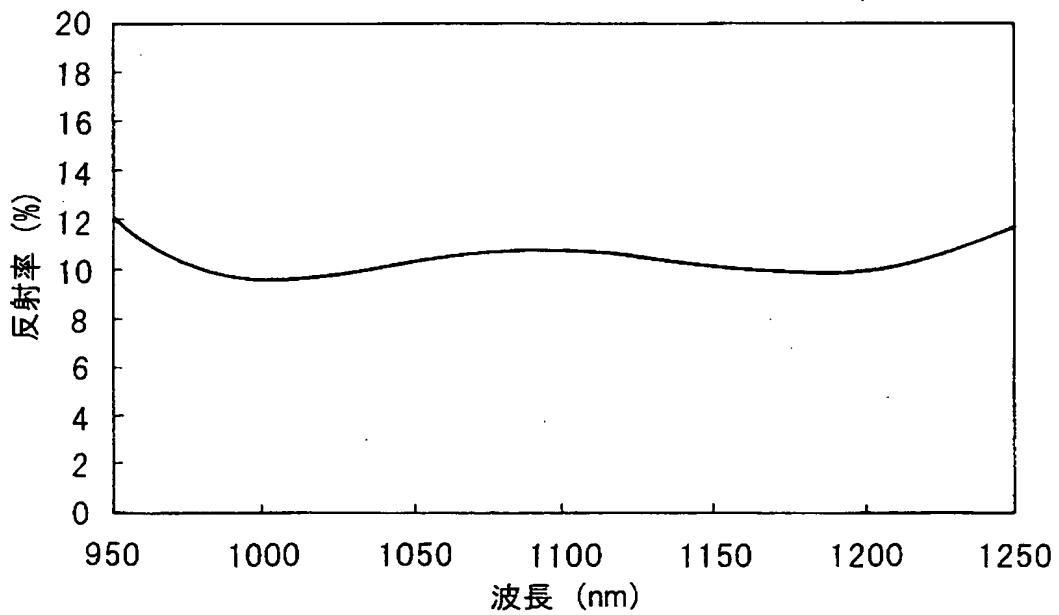
【図87】



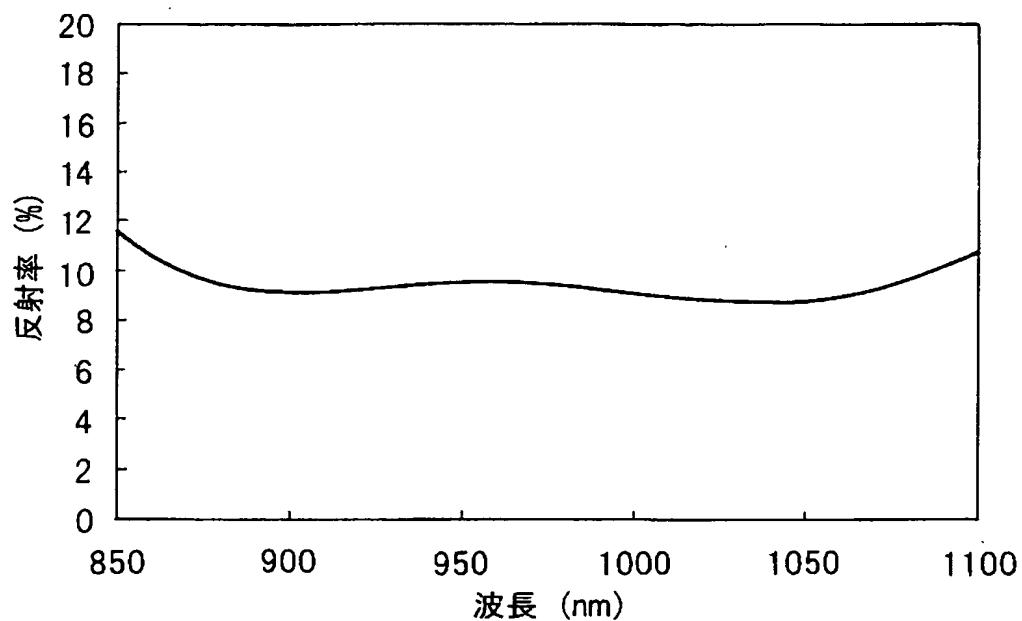
【図88】



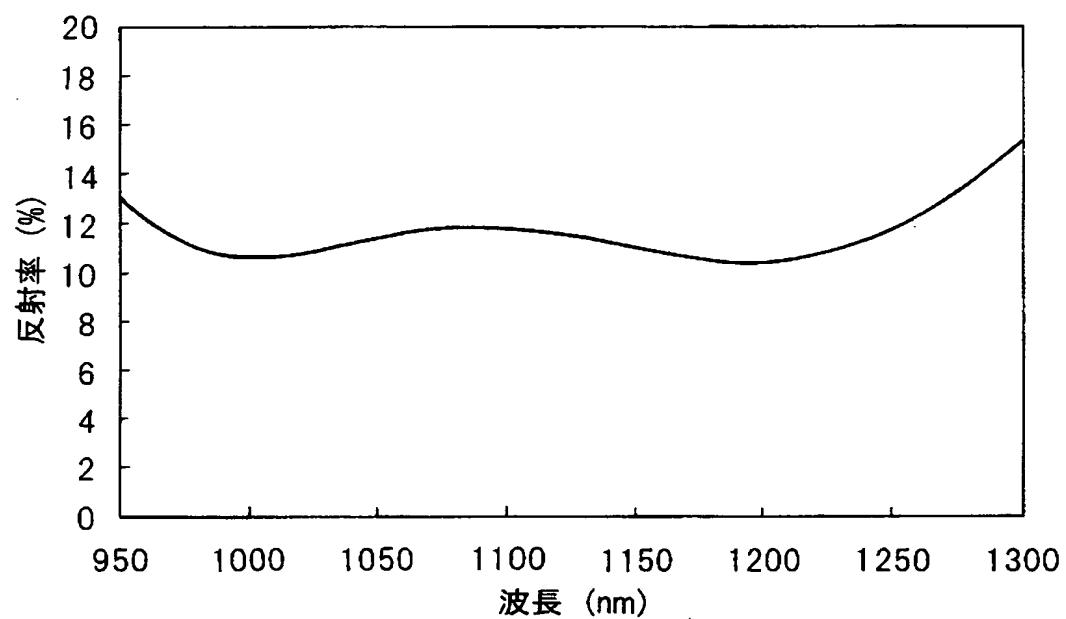
【図89】



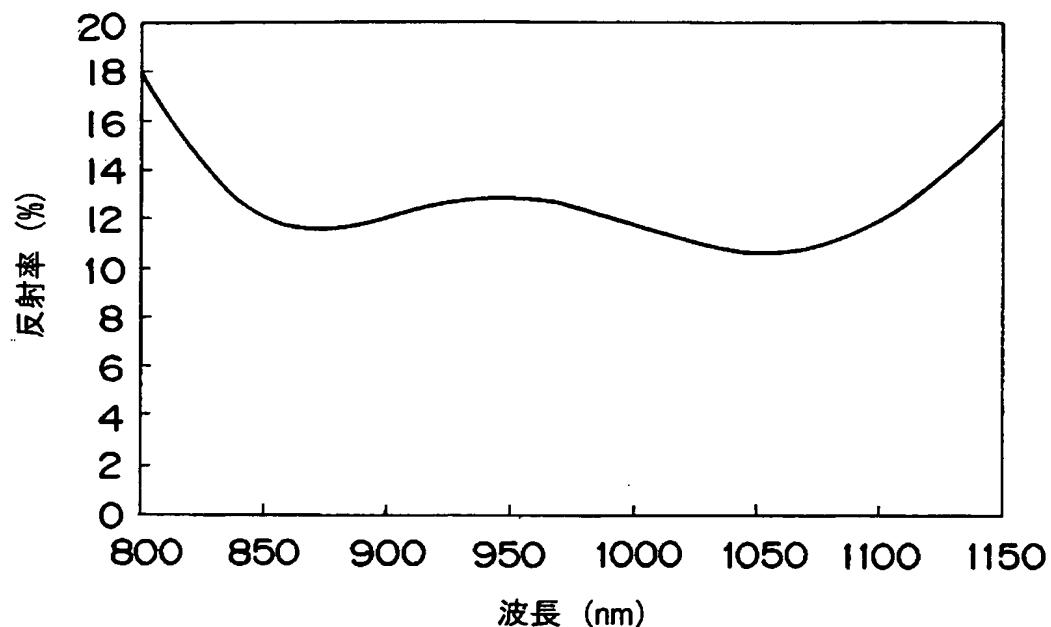
【図90】



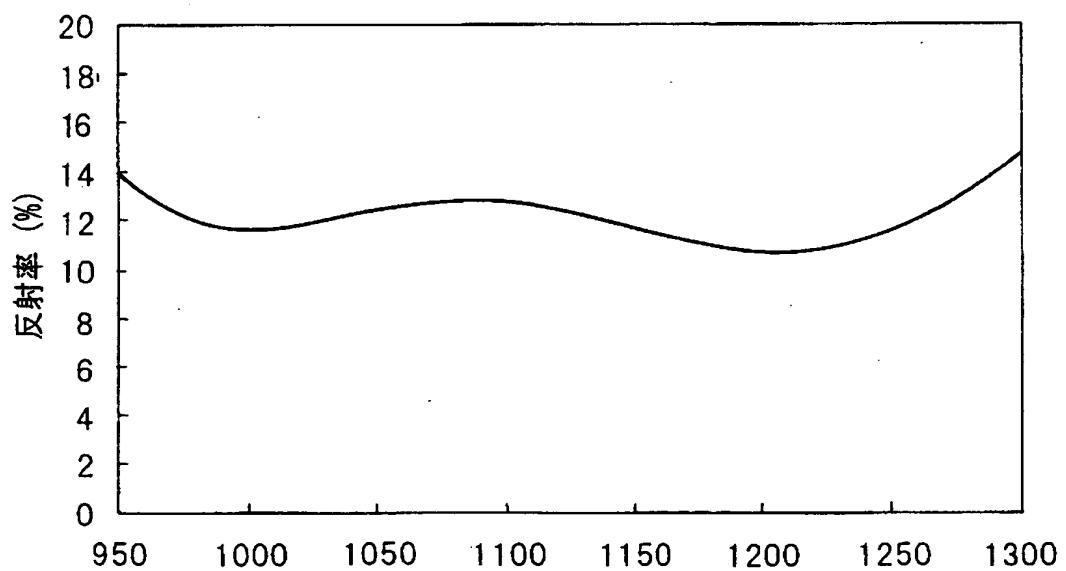
【図91】



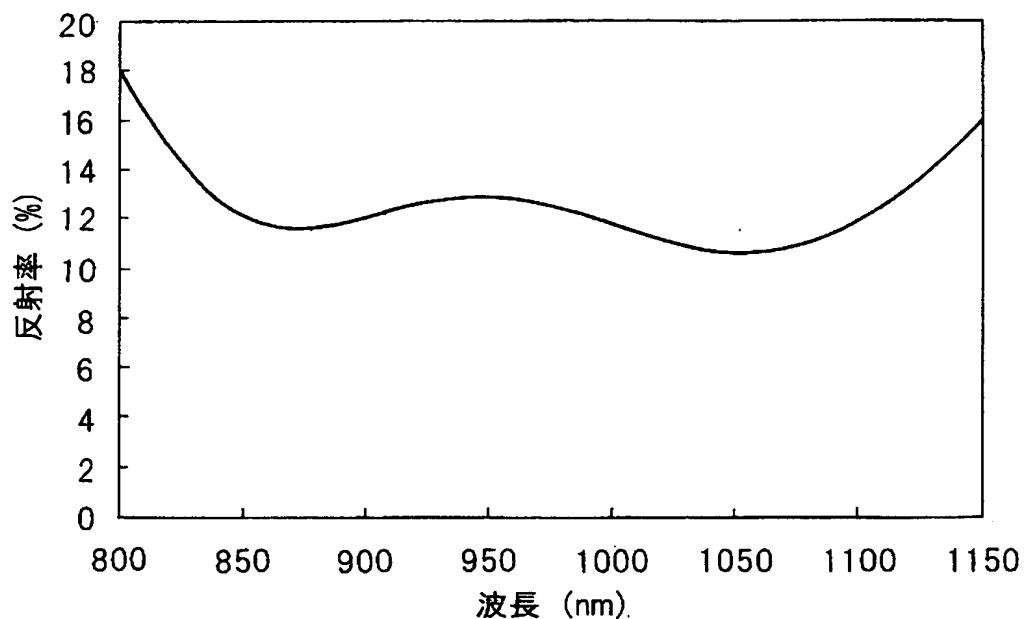
【図92】



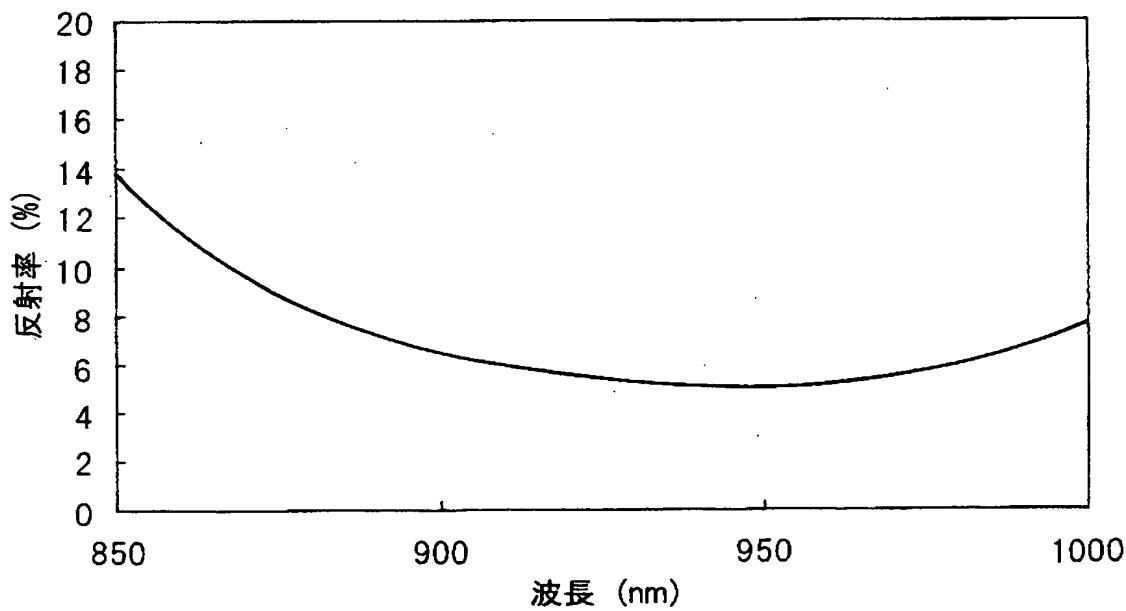
【図93】



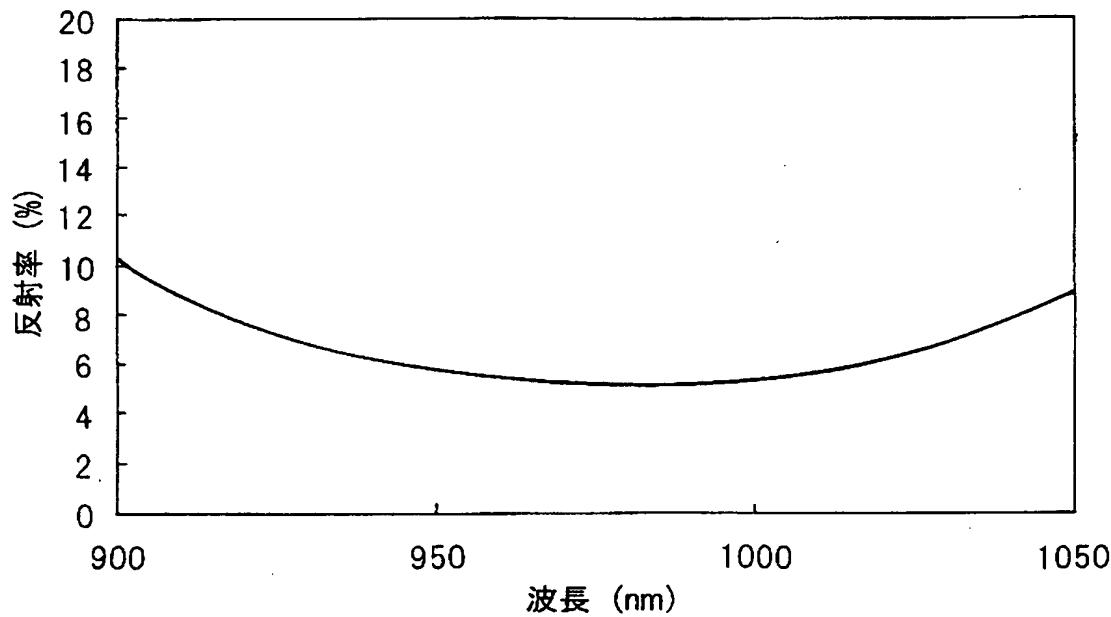
【図94】



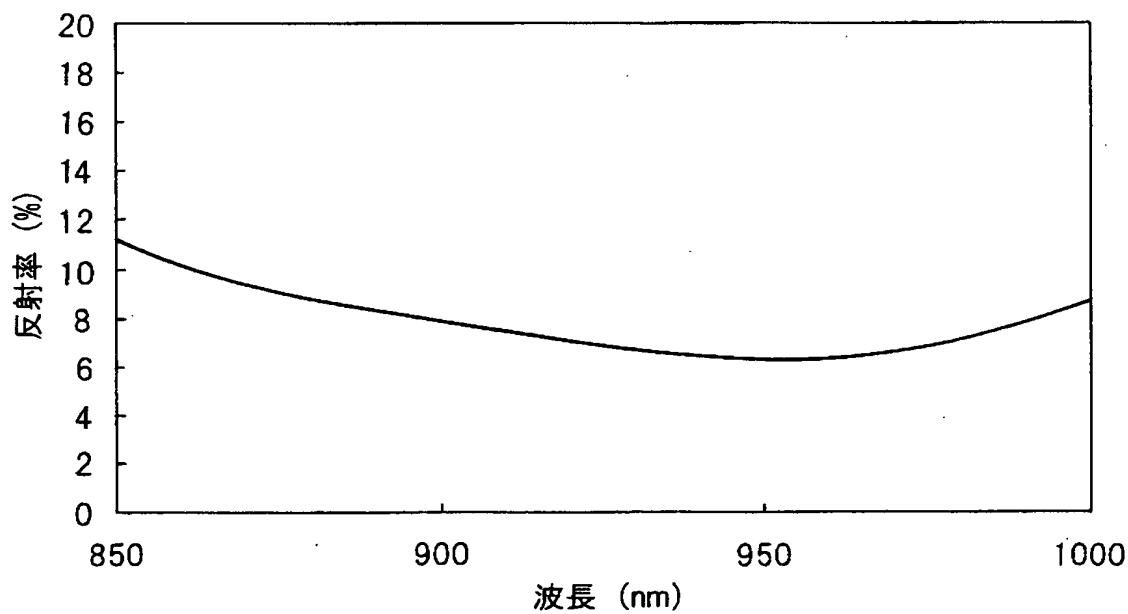
【図95】



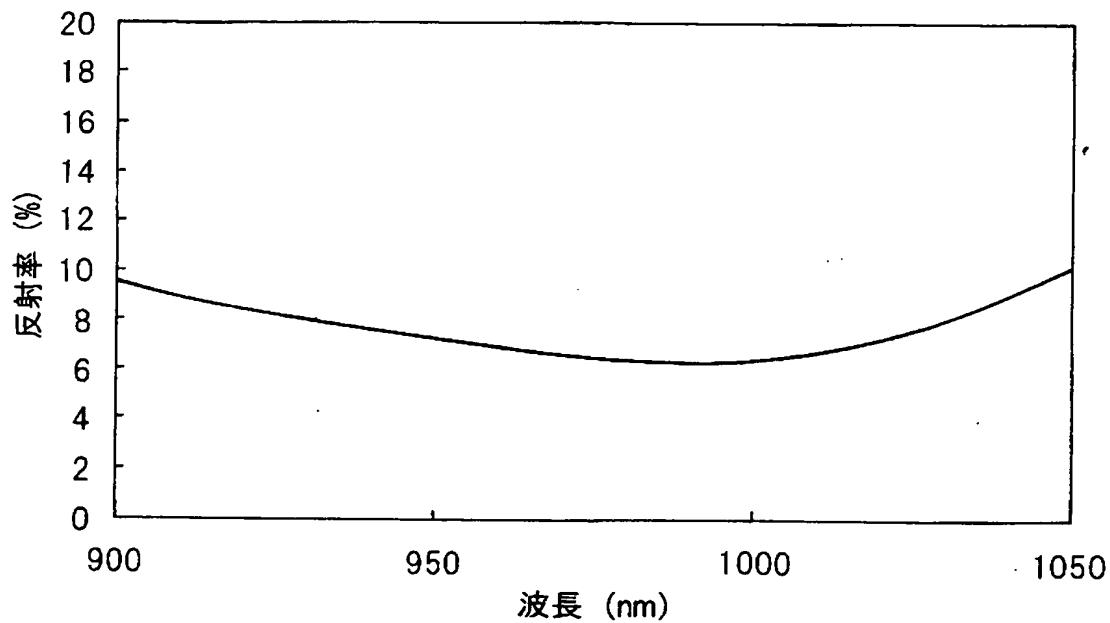
【図96】



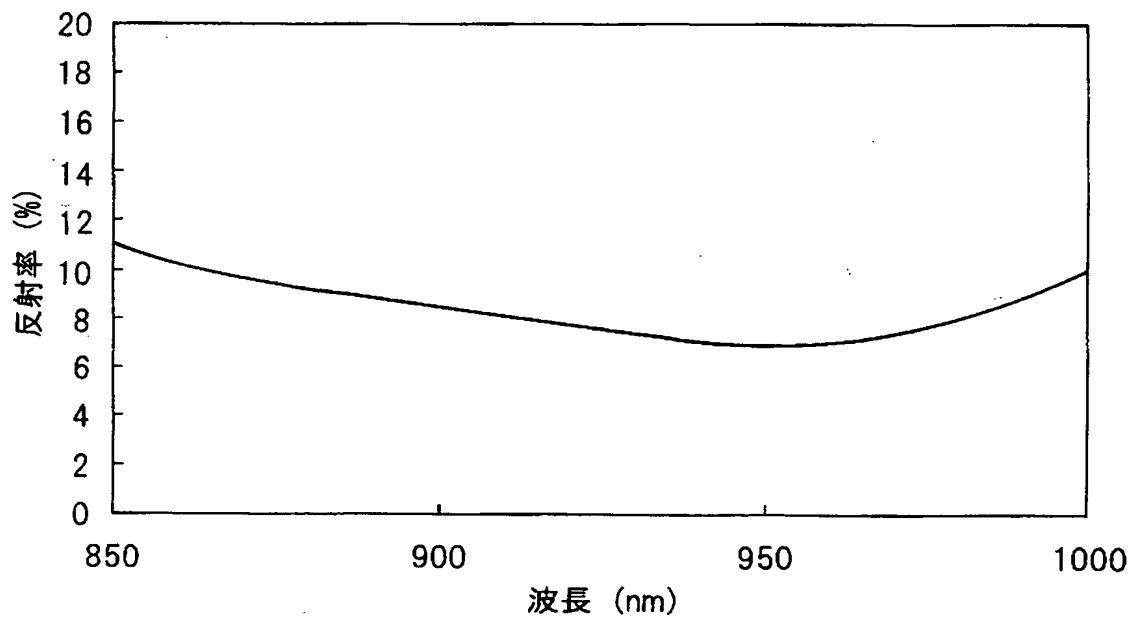
【図97】



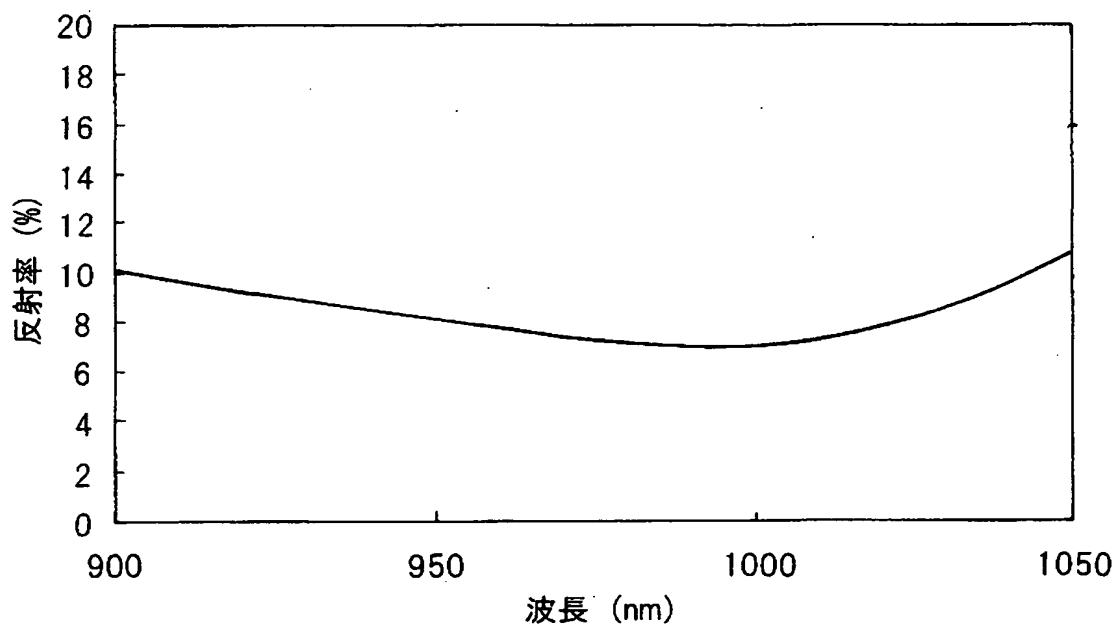
【図98】



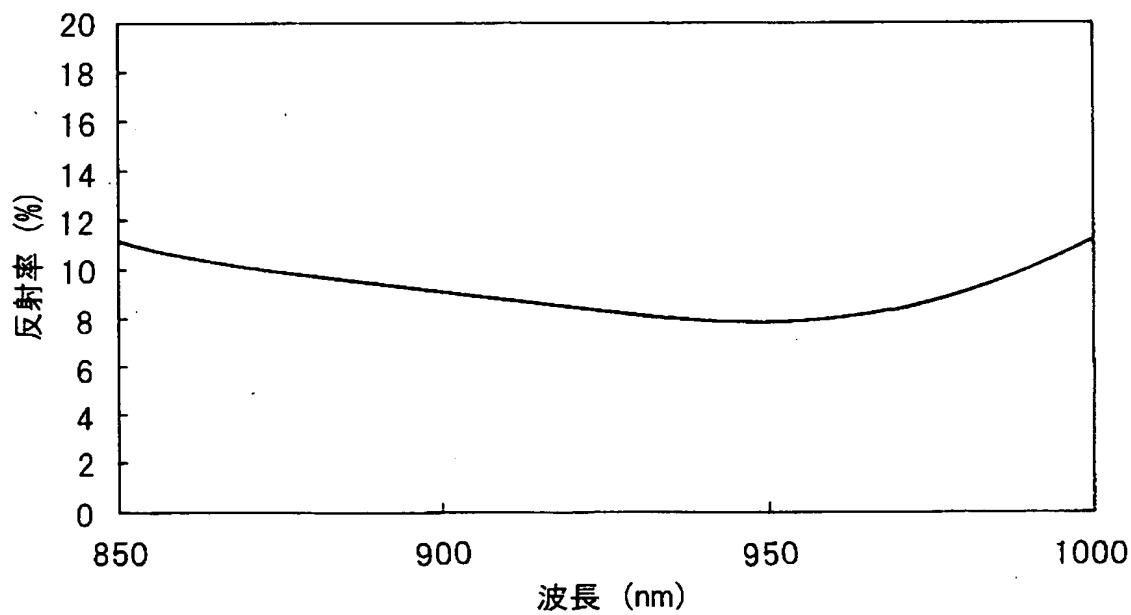
【図99】



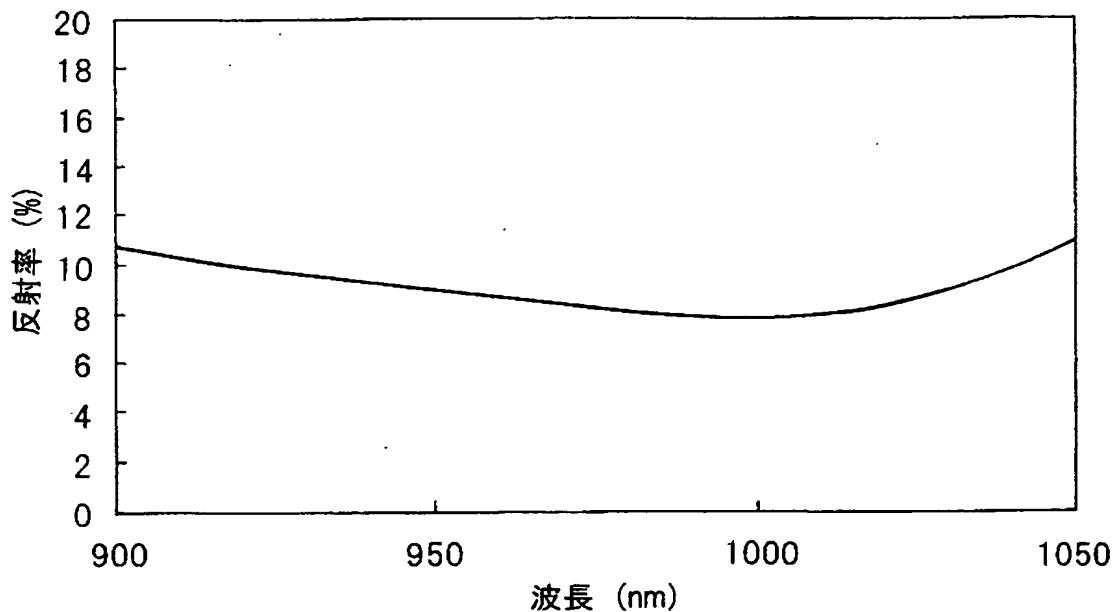
【図100】



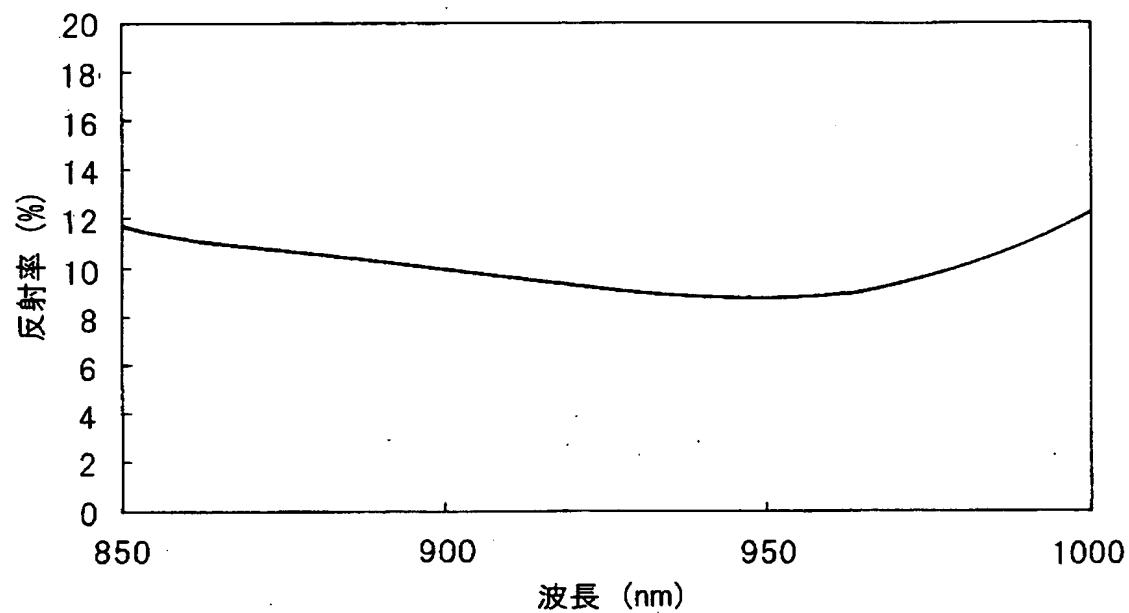
【図101】



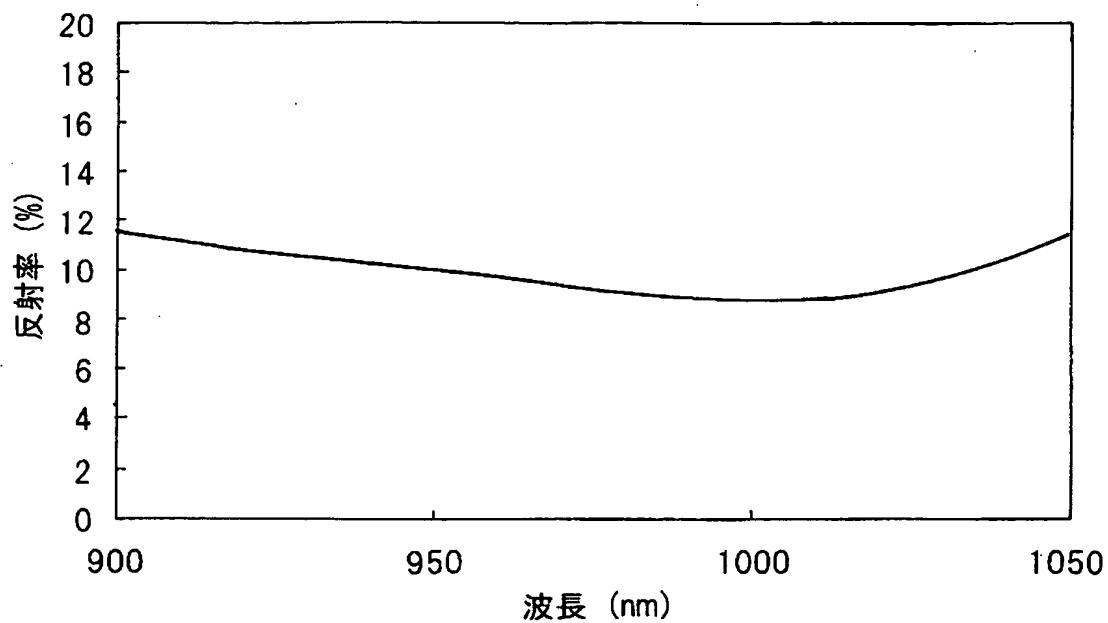
【図102】



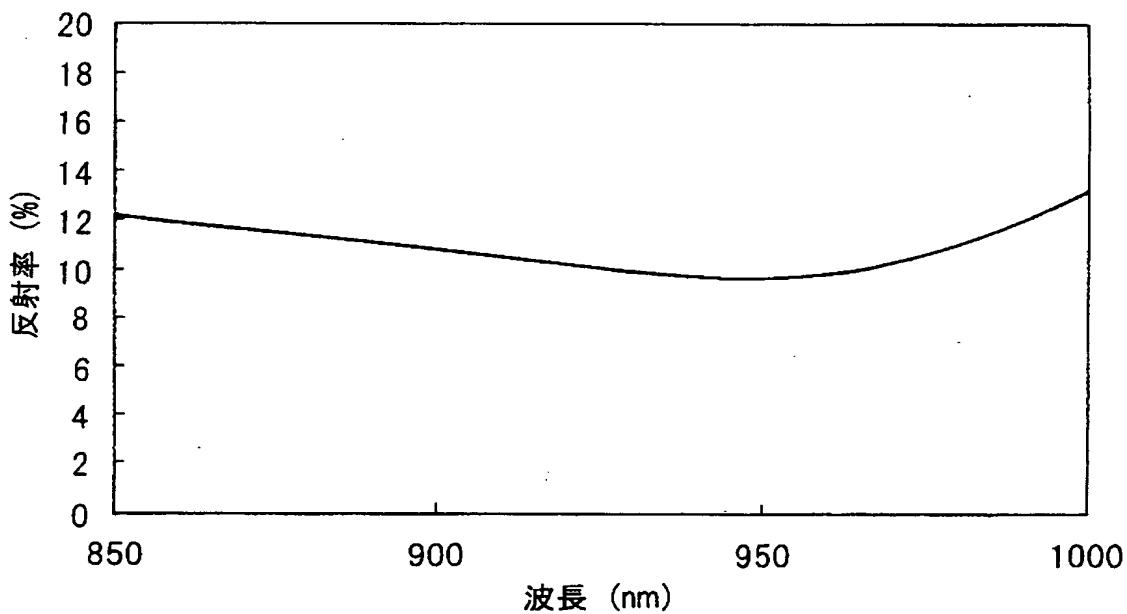
【図103】



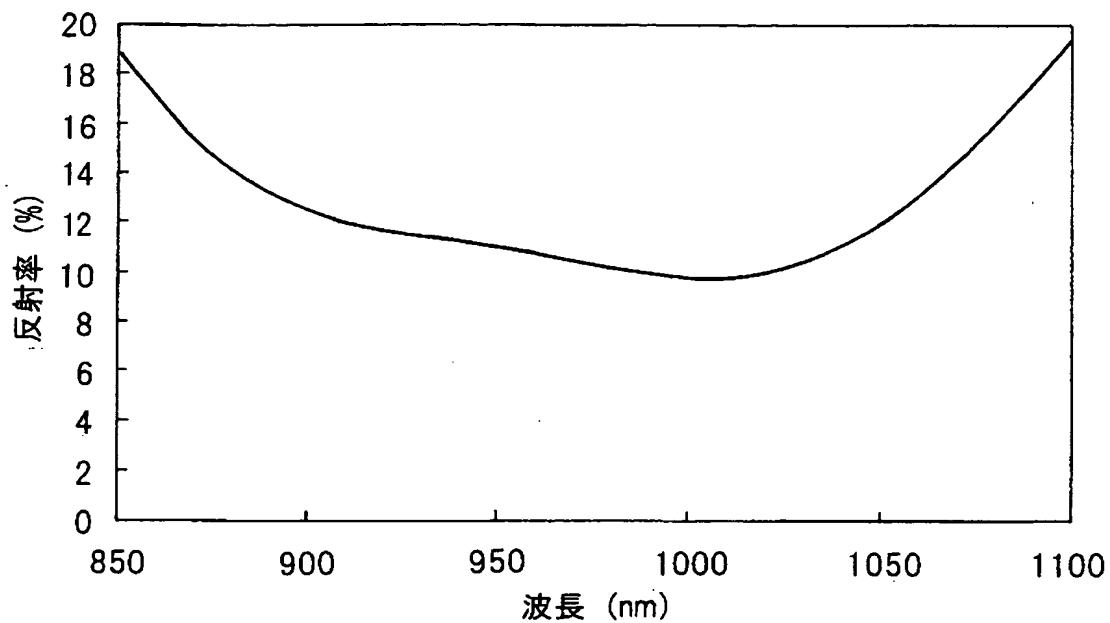
【図104】



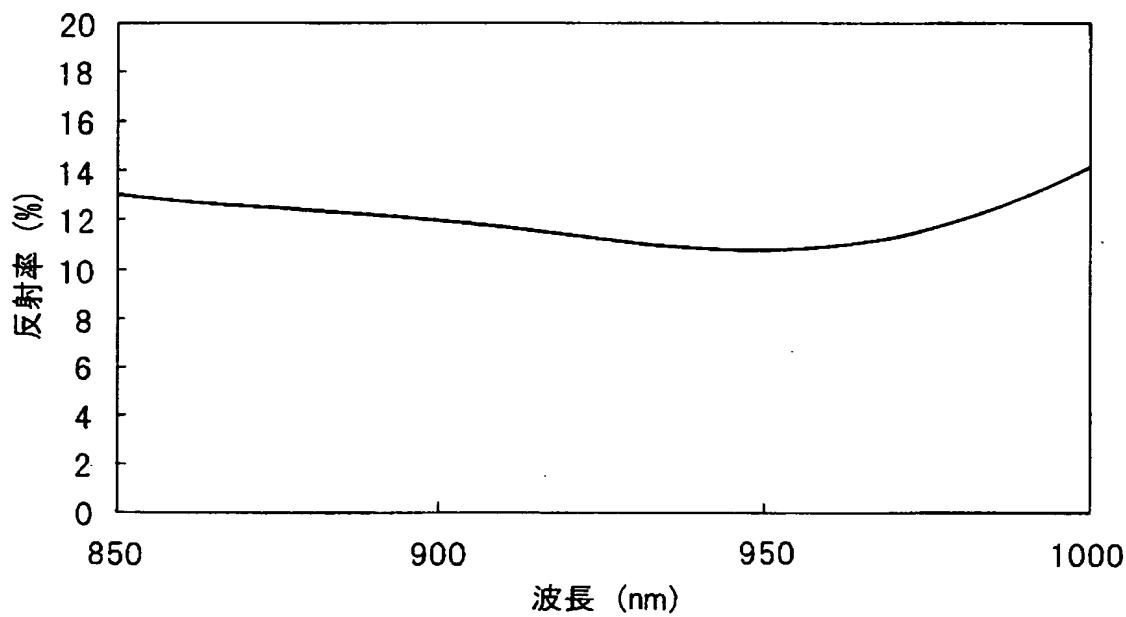
【図105】



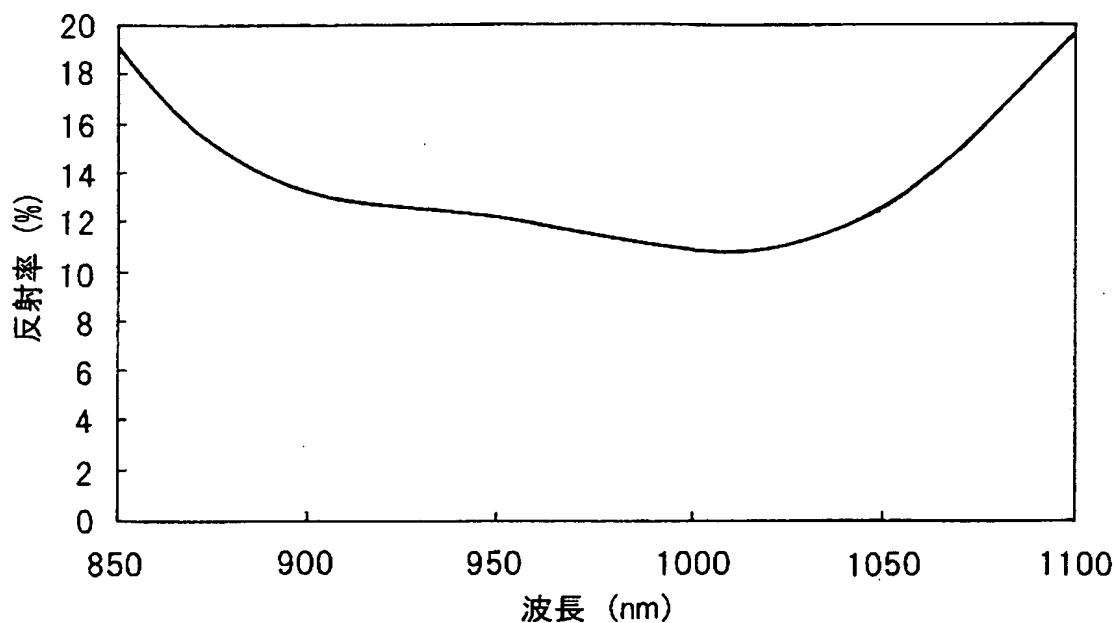
【図106】



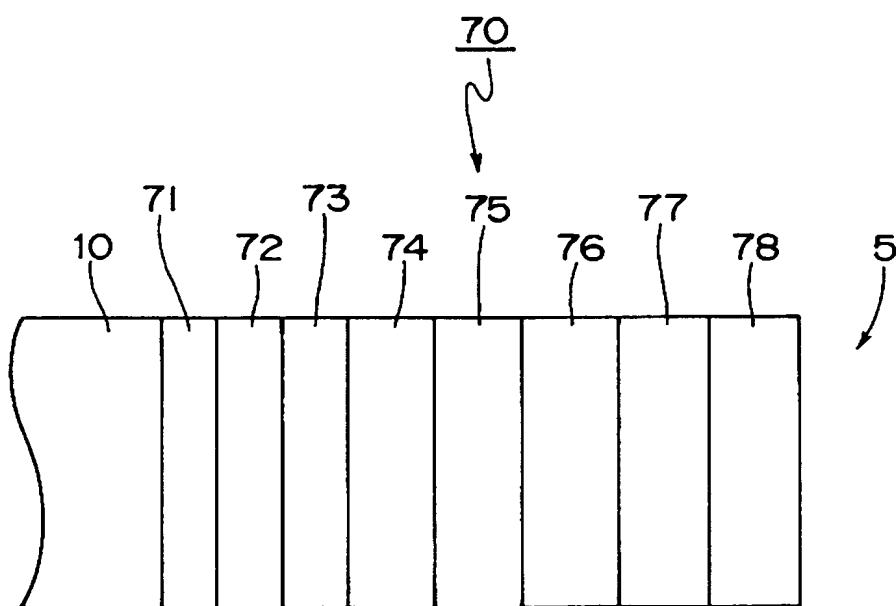
【図107】



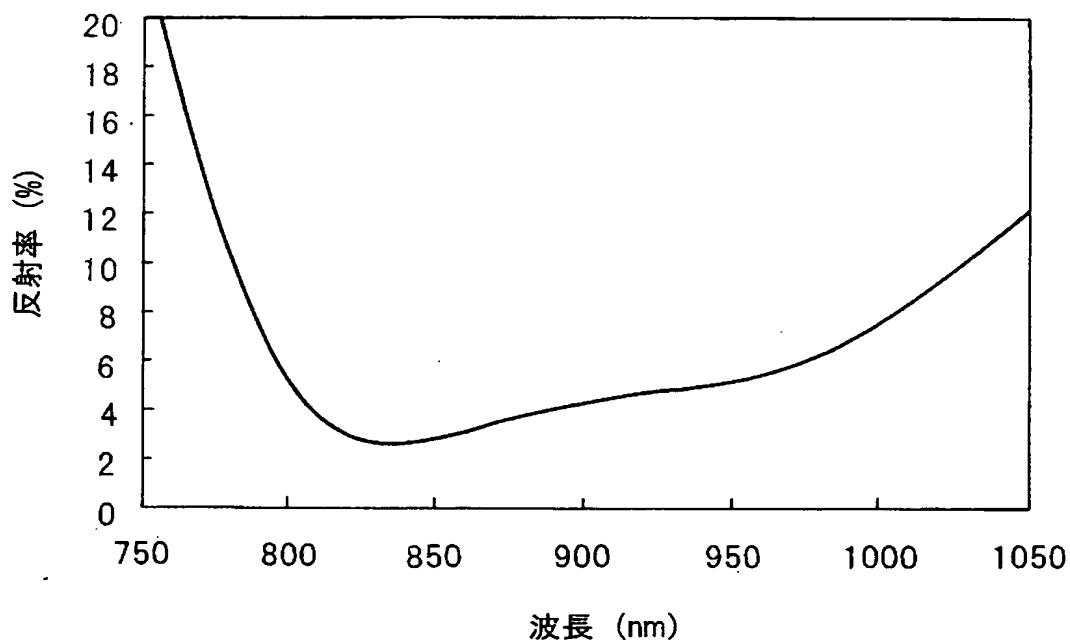
【図108】



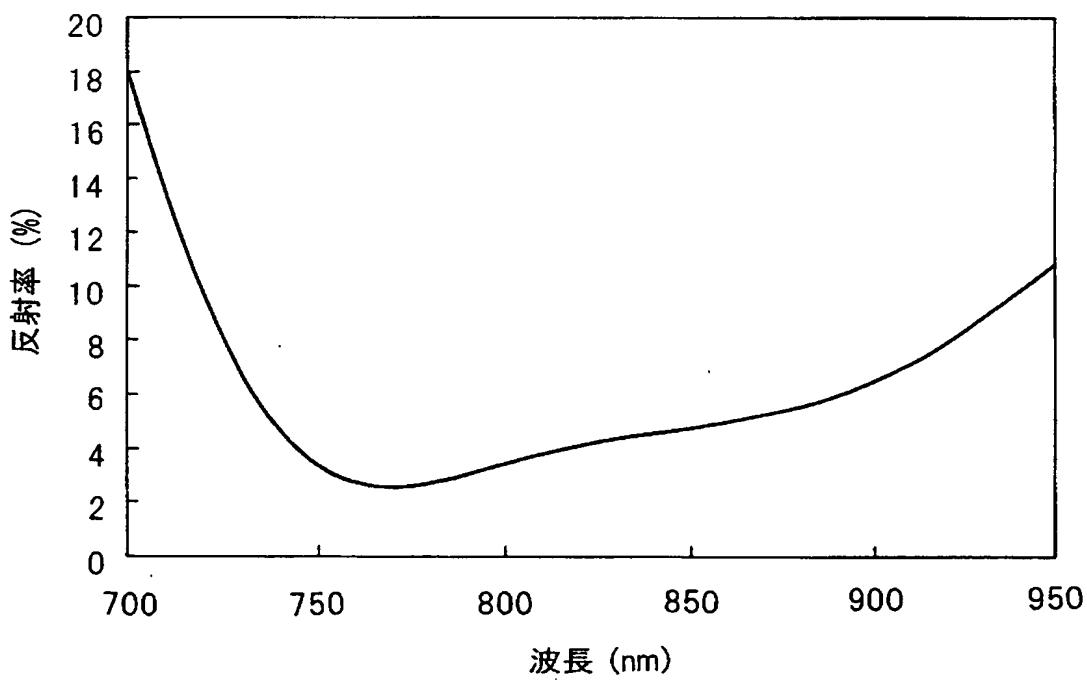
【図109】



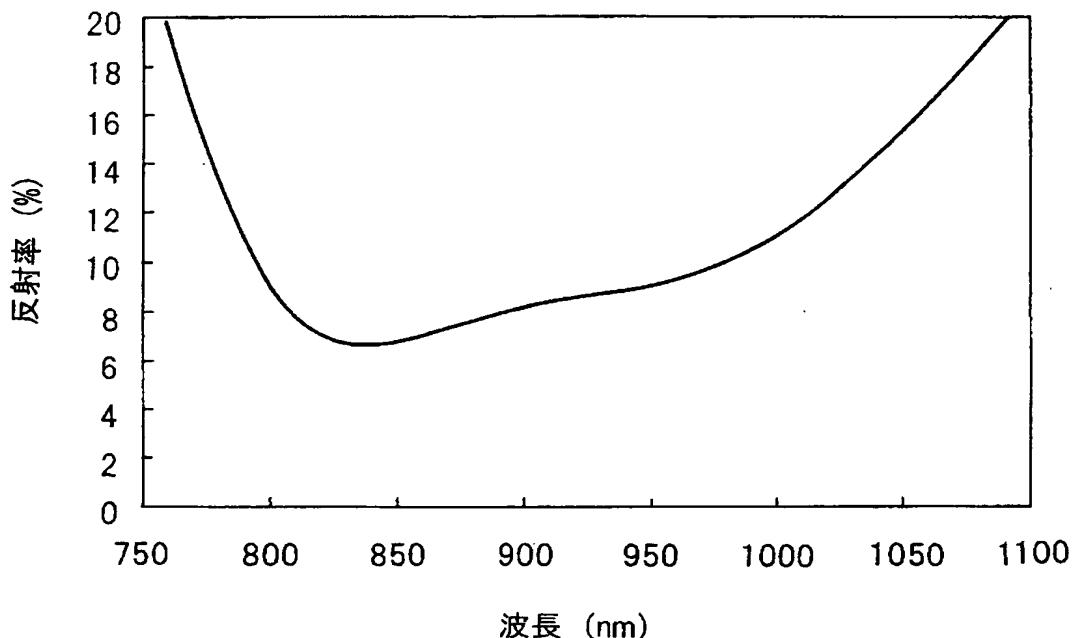
【図110】



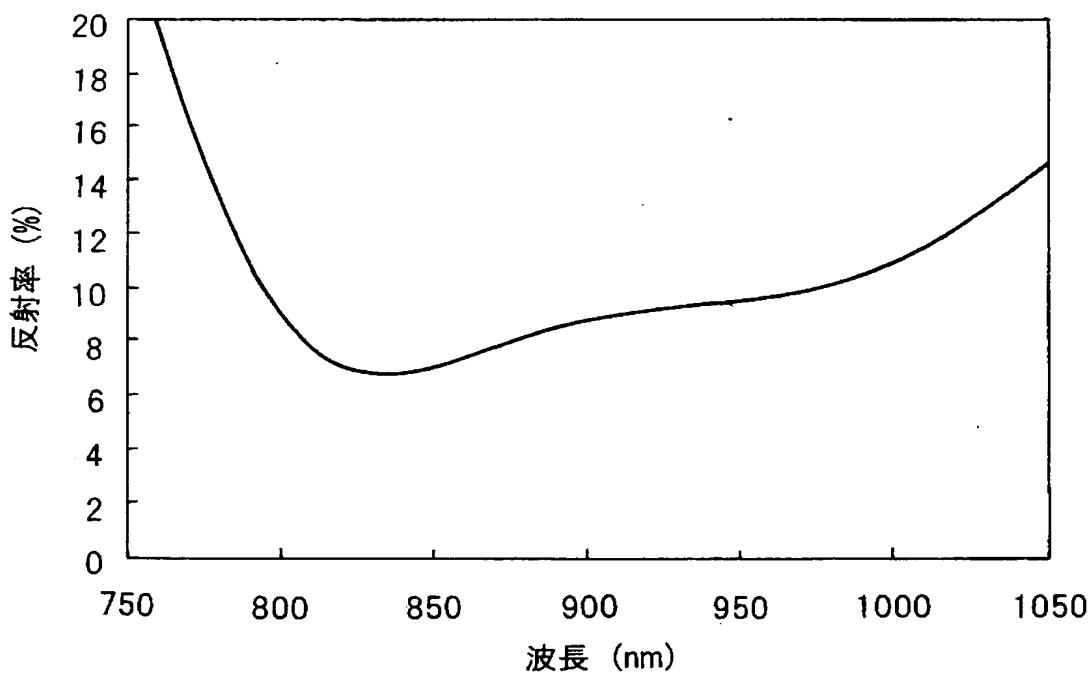
【図111】



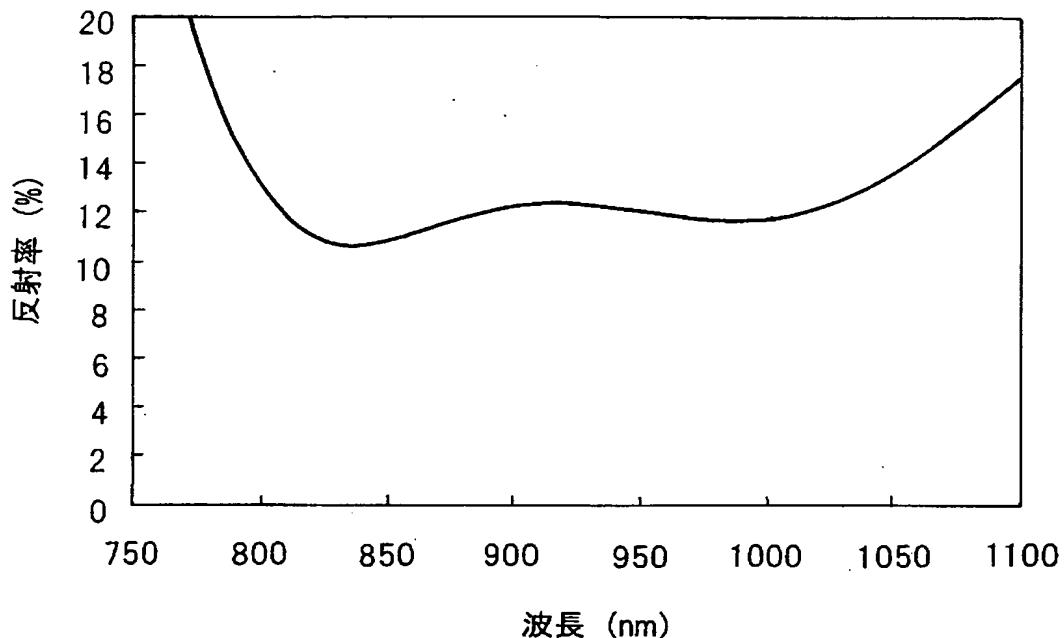
【図112】



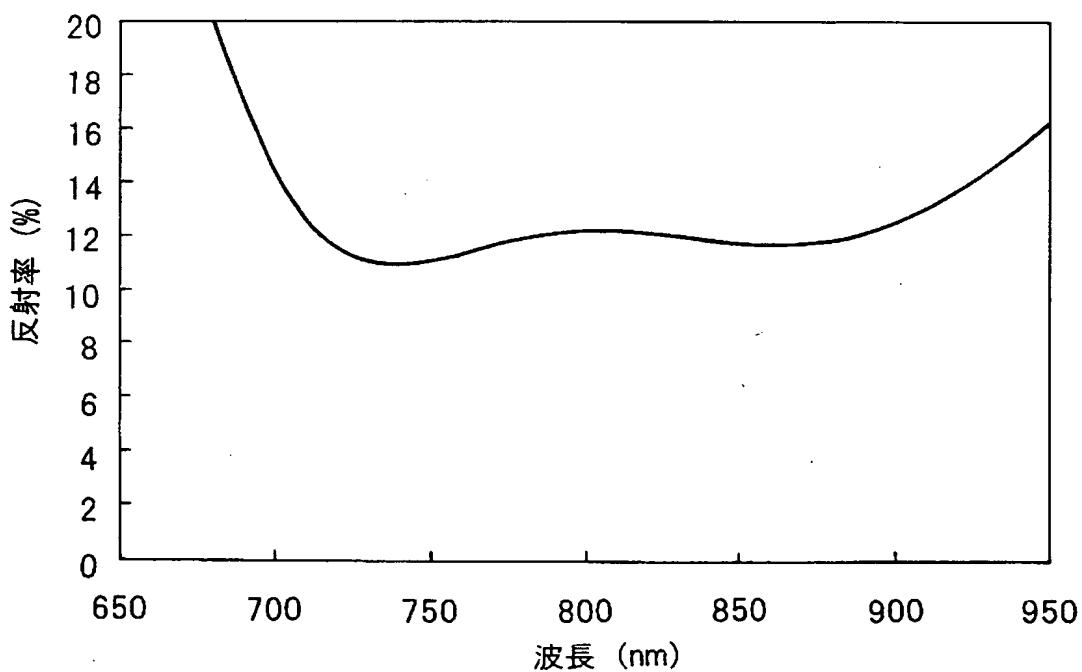
【図113】



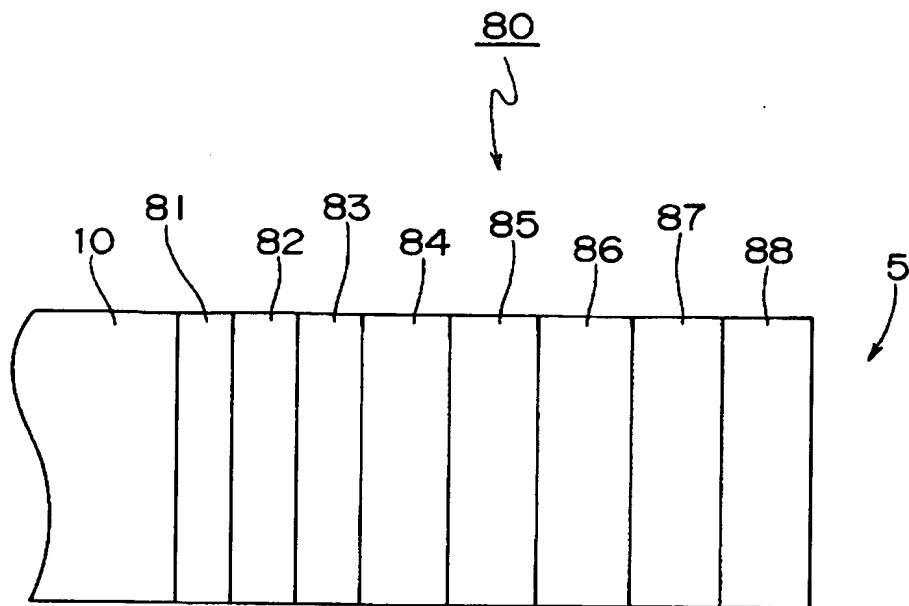
【図114】



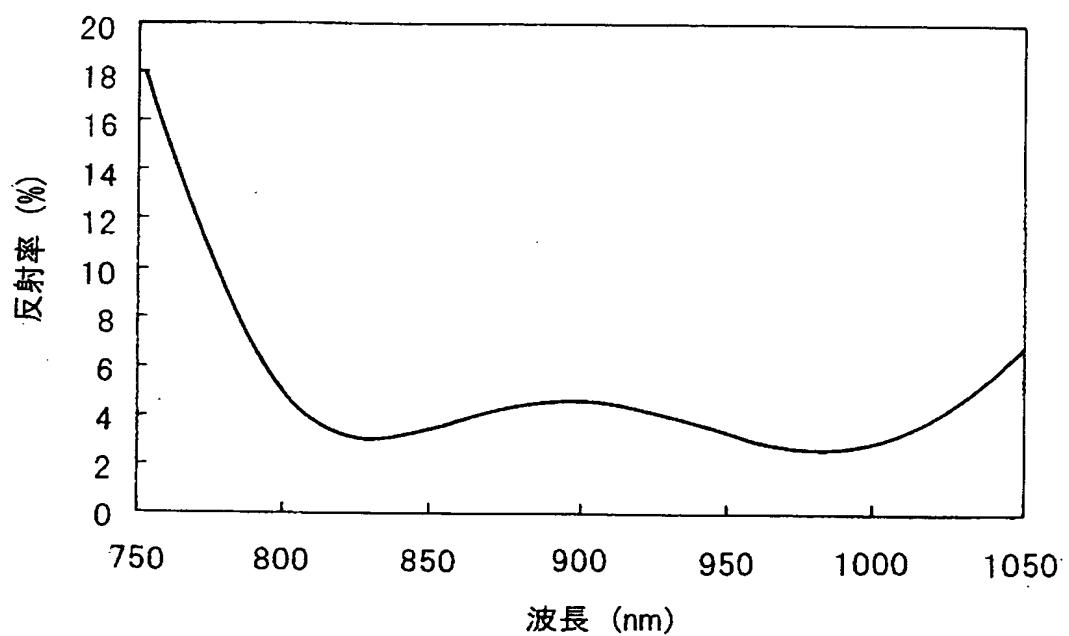
【図115】



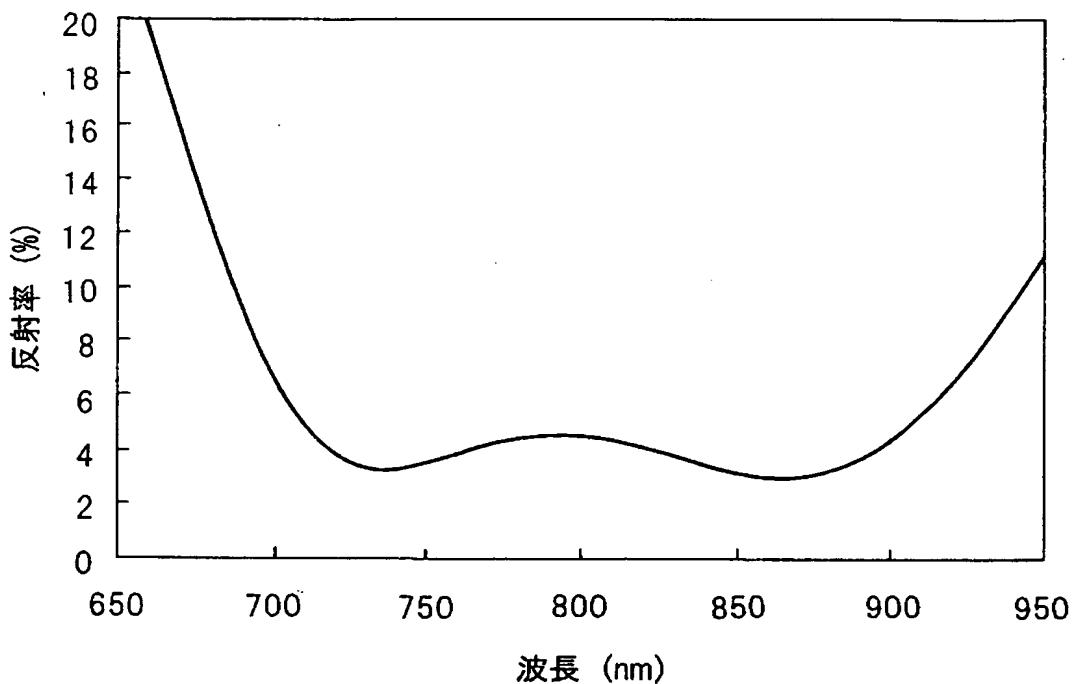
【図116】



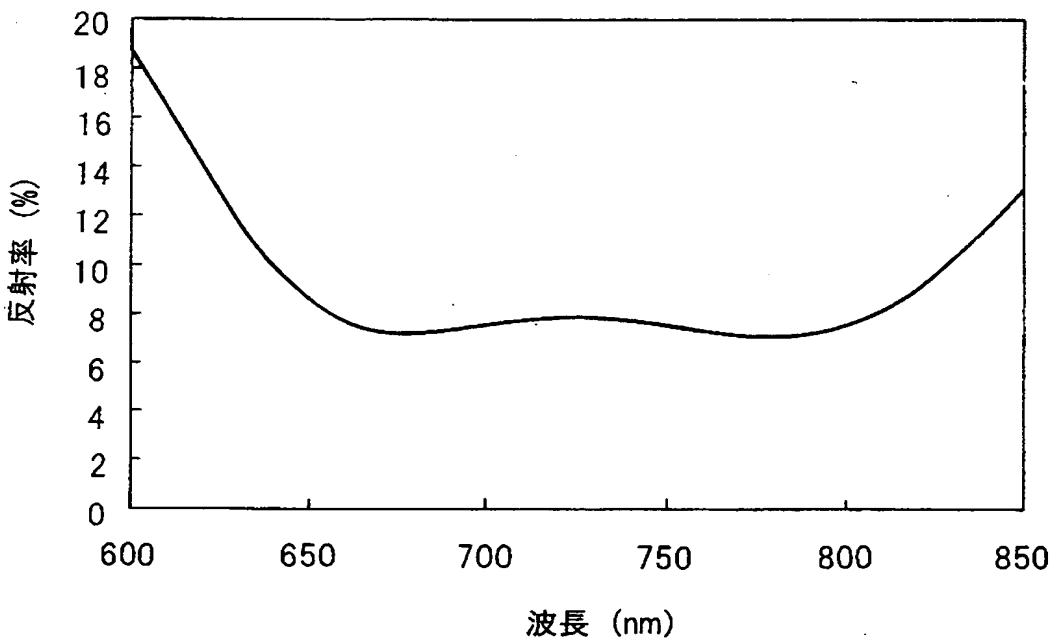
【図117】



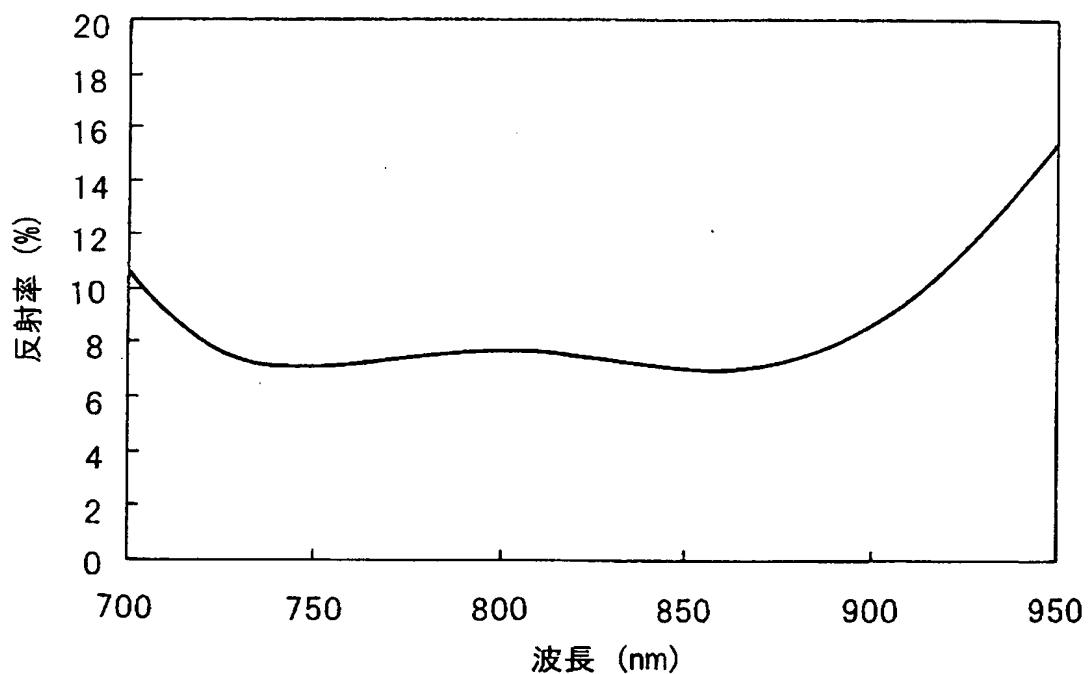
【図118】



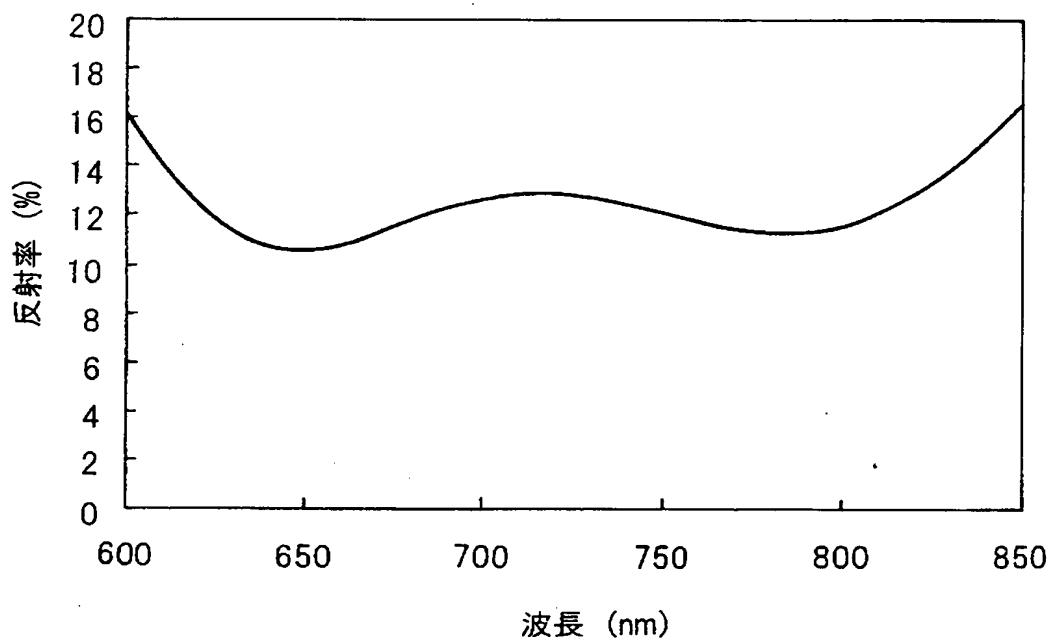
【図119】



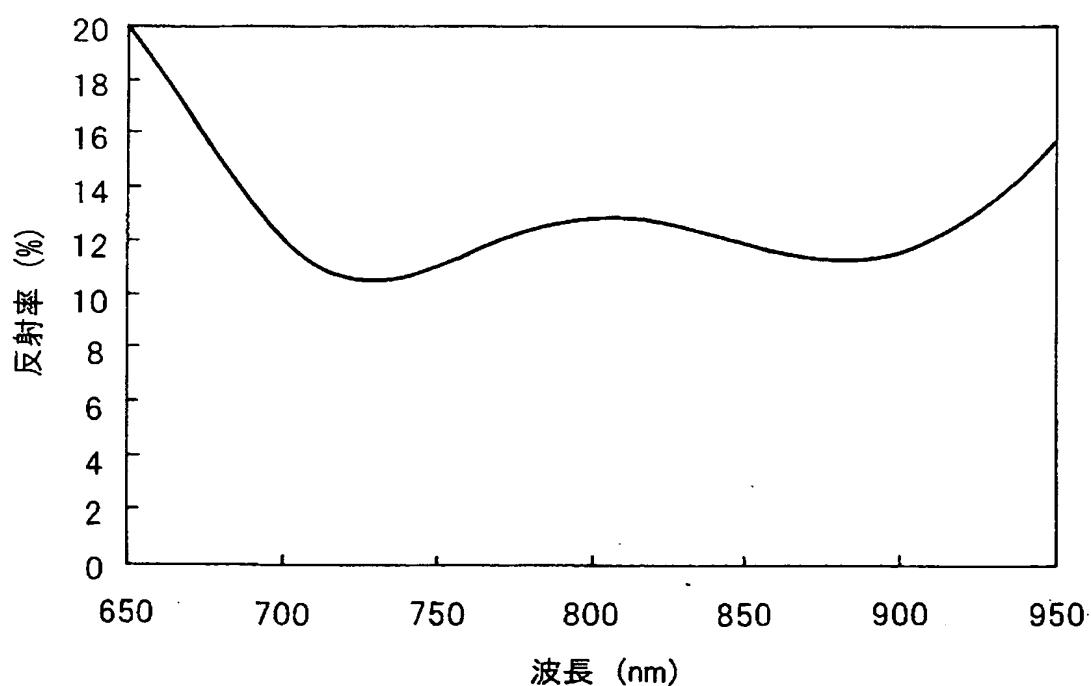
【図120】



【図121】



【図122】



【書類名】要約書

【要約】

【課題】 広い波長帯域にわたって低反射率を有する反射膜を備えた半導体光素子を提供する。

【解決手段】 半導体光素子は、活性層と、前記活性層を挟む2枚のクラッド層とからなる導波層10を含む積層構造体と、前記積層構造体の一対の相対する端面部のうち少なくとも一方の端面部に形成された多層反射膜20とを備え、前記多層反射膜は、それぞれの膜の屈折率n_iと膜厚d_iとの積n_id_iの総和Σn_id_iが、前記導波層を導波する光の波長λについて、Σn_id_i > λ/4の関係を満足すると共に、前記多層反射膜は、反射率が前記波長λの場合の反射率R(λ)を基準として-1%から+2.0%の範囲内となる前記波長λを含む連続する波長帯域幅△λを、前記波長λで割った値△λ/λが0.062以上である。

【選択図】 図5

認定・付加情報

特許出願の番号	特願 2003-275554
受付番号	50301181345
書類名	特許願
担当官	第二担当上席 0091
作成日	平成 15 年 7 月 22 日

<認定情報・付加情報>

【特許出願人】

【識別番号】	000006013
【住所又は居所】	東京都千代田区丸の内二丁目 2 番 3 号
【氏名又は名称】	三菱電機株式会社
【代理人】	申請人
【識別番号】	100086405
【住所又は居所】	大阪府大阪市中央区城見 1 丁目 3 番 7 号 IMP ビル 青山特許事務所
【氏名又は名称】	河宮 治

【選任した代理人】

【識別番号】	100098280
【住所又は居所】	大阪府大阪市中央区城見 1 丁目 3 番 7 号 IMP ビル 青山特許事務所
【氏名又は名称】	石野 正弘

【選任した代理人】

【識別番号】	100113170
【住所又は居所】	大阪府大阪市中央区城見 1 丁目 3 番 7 号 IMP ビル 青山特許事務所
【氏名又は名称】	稻葉 和久

特願2003-275554

出願人履歴情報

識別番号 [000006013]

1. 変更年月日 1990年 8月24日
[変更理由] 新規登録
住 所 東京都千代田区丸の内2丁目2番3号
氏 名 三菱電機株式会社